



**INSTITUTO
TECNOLÓGICO
VALE**

**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA PARA SUPORTE À DECISÃO DE
ALTERAÇÕES FÍSICAS E DE CONTROLE EM PROCESSOS DE COMINUIÇÃO**

Robson Aparecido Duarte

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2021**

Robson Aparecido Duarte

**APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA PARA SUPORTE À DECISÃO DE
ALTERAÇÕES FÍSICAS E DE CONTROLE EM PROCESSOS DE COMINUIÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Thiago Antonio Melo Euzébio,
D.Sc.

Ouro Preto
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D812a Duarte, Robson Aparecido.

Aplicação de simulação dinâmica para suporte à decisão de alterações físicas e de controle em processos de cominuição. [manuscrito] / Robson Aparecido Duarte. - 2021.

120 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Sistemas de controle - Automação. 2. Métodos de simulação. 3. Beneficiamento de minério - Processo decisório. I. Euzébio, Thiago Antonio Melo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5:622.7

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.
PROCESSOS DE MIN.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Robson Aparecido Duarte

Aplicação de Simulação Dinâmica para Suporte à Decisão de Alterações Físicas e de Controle em Processos de Cominuição

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Aprovada em 10 de Setembro de 2021

Membros da banca

Doutor - Thiago Antonio Melo Euzébio - Orientador - Instituto Tecnológico Vale
Doutora - Carmela Maria Polito Braga - Universidade Federal de Minas Gerais
Doutor - Caio Fernandes de Paula - Universidade Federal de Itajubá
Doutor - José Mário Araújo - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia
Mestre - Helder Silva Souza - Vale SA

Thiago Antonio Melo Euzébio, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 27/09/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Agnaldo Jose da Rocha Reis, COORDENADOR(A) DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INSTRUMENTAÇÃO CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE PROC DE MINERAÇÃO**, em 06/10/2021, às 09:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0229489** e o código CRC **E7D4F28E**.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, e à minha família por todo apoio dado em cada uma das etapas da minha vida, incluindo essa que se encerra agora.

Agradeço ao Cristhian Gomes, meu padrinho dos tempos de estagiário, por me apresentar a esse mestrado. Minha gratidão também ao Instituto Tecnológico Vale, à Vale e à Universidade Federal de Ouro Preto. Estendo os agradecimentos aos meus parceiros da 4ª Turma do PROFICAM, em especial ao Levi, Léo, Speto e Luan; também ao Thomás, André, Moisés, Luciano, Santino, Wellington, Ênio e demais membros do Laboratório de Robótica e Controle do ITV. Todos vocês contribuíram de alguma forma para que eu chegasse nesse momento.

Meus agradecimentos também ao Alexandre Fonseca e ao Kaike Albuquerque, hoje meus colegas de trabalho em S11D.

Por fim, meu muito obrigado também ao Thiago Euzébio pela orientação nas pesquisas realizadas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale S.A.

*“Eu tropeço no possível, e não
desisto de fazer a descoberta do
que tem dentro da casca do
impossível”
(Carlos Drummond de Andrade).*

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA PARA SUPORTE À DECISÃO DE ALTERAÇÕES FÍSICAS E DE CONTROLE EM PROCESSOS DE COMINUIÇÃO

Robson Aparecido Duarte

Setembro/2021

Orientador: Thiago Antonio Melo Euzébio

Representações virtuais podem ser usadas para reduzir custos e acelerar o processo de tomada de decisão por meio da simulação de equipamentos e processos. Em situações que envolvam a necessidade de distribuição de material entre silos e o transporte de material por correias, a tomada de decisão pode estar associada a alterações físicas e de controle. Ambas alterações buscam reduzir o comportamento instável do nível dos silos e o tempo dos transportadores operando abaixo de sua capacidade nominal. Tais comportamentos podem levar à redução da produtividade e ao aumento do desgaste de equipamentos como britadores. Dessa forma, este trabalho propõe aplicar a simulação para aumentar a produtividade em três situações de S11D, uma unidade de operação da Vale no Pará. Na primeira delas, a simulação mostra se há uma melhor forma de substituição de alguns britadores por outros de maior capacidade, dentre algumas configurações pré-determinadas. Na segunda situação, com o auxílio da simulação, este trabalho busca a identificação da velocidade máxima de translação do sistema de cabeça móvel que melhor distribua o material nos silos, dentre algumas opções possíveis. A terceira situação utiliza simulação para propor e comparar uma estratégia de controle da velocidade dos alimentadores da área de peneiramento, de forma a obter melhor utilização da capacidade nominal das correias que a obtida com a estratégia existente na usina. Sendo um dos principais equipamentos do circuito de britagem, outro foco desse trabalho é propor uma nova estratégia de calibração de parâmetros de britadores cônicos baseando-se na utilização de otimização e incluindo todos os elementos da matriz de quebra como parâmetros a serem calibrados, diferente da forma comumente apresentada na literatura. Como resultado, as simulações realizadas nesse trabalho foram capazes de identificar o melhor cenário em cada situação, inclusive com ganhos

observados após a aplicação na planta real. Além disso, esse trabalho também mostra que a estratégia proposta para a calibração dos parâmetros de britadores cônicos pode trazer resultados mais acurados, sendo válida também para representar mais de um valor de Abertura na Posição Fechada (*Closed Side Setting*, CSS).

Palavras-chave: Simulação dinâmica, Tomada de decisão, Calibração de Parâmetros.

Macrotema: Usina; **Linha de Pesquisa:** Análise e Projeto de Sistemas de Controle Avançado; **Tema:** Redução de Variabilidade e Melhoria de Controle; **Área Relacionada da Vale:** S11D e Serra Leste.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

APPLICATION OF DYNAMIC SIMULATION TO SUPPORT THE DECISION IN HARDWARE AND CONTROL RELATED CHANGES IN MINERAL COMMINATION PROCESSES

Robson Aparecido Duarte

September/2021

Advisor: Thiago Antonio Melo Euzébio

Virtual representations can be used to reduce costs and speed up the decision-making process through equipment and process simulation. In situations involving the need to distribute of material between silos and transportation of material by conveyor belts, decision-making can be associated with hardware and control-related changes. Both changes seek to reduce unstable behavior at the silos level and the time of conveyors operating below their nominal capacity. Such behaviors can lead to reduced productivity and increased wear on equipment such as crushers. Thus, this work proposes to apply the simulation to increase productivity in three situations of S11D, an operating unit of Vale in Pará, Brazil. In the first one, the simulation shows whether there is a better way to replace some crushers with others of higher capacity, among some pre-determined settings. In the second situation, with the help of simulation, this work seeks to identify the maximum translation speed of the moving head system that distributes the material in the silos in the best way, among some possible options. The third situation uses simulation to propose and compare a speed control strategy for the feeders in the screening area to obtain better use of the nominal capacity of the conveyors than the one obtained with the approach existing in the plant. As one of the main pieces of equipment in the crushing circuit, another focus of this work is to propose a strategy for calibrating the cone crusher's parameters, based on the use of optimization and including all elements of the breakage matrix as parameters to be calibrated, unlike the form typically presented in the literature. As result, the simulations carried out in this work were able to identify the best scenario in each situation, including gains observed after application in the actual plant. In addition, this work also shows that the strategy

proposed for the calibration of cone crusher parameters can bring more accurate results, being also valid to represent more than one Closed Side Setting (CSS) value.

Keywords: Dynamic simulation, Decision-making, Parameter Calibration.

Macrotheme: Plant; **Research Line:** Analysis and Design of Advanced Control Systems; **Theme:** Variability Reduction and Control Improvement; **Related Area of Vale:** S11D and Serra Leste.

Lista de Figuras

Figura 1.1	Produtividade na Usina 2 de S11D antes e após aplicações de melhorias.	23
Figura 2.1	Correia transportadora e alguns de seus componentes.	27
Figura 2.2	Exemplos de disposições de correias.	27
Figura 2.3	Correia Transportadora com Translação de Cabeça Móvel (Cabeça móvel representada em diferentes posições).	28
Figura 2.4	Representação de alimentador de correia e seu dispositivo de carregamento.	29
Figura 2.5	Exemplos de geometrias irregulares de silos.	30
Figura 2.6	Relação entre altura e volume à esquerda. Desenho esquemático do silo à direita.	30
Figura 2.7	Britador cônico.	31
Figura 2.8	Diagrama de blocos da representação do modelo do britador cônico.	32
Figura 2.9	Representação esquemática da função de classificação.	33
Figura 2.10	Representação de uma peneira e seus fluxos de material.	35
Figura 2.11	Legenda para os Fluxogramas.	37
Figura 2.12	Fluxograma simplificado de S11D.	38
Figura 2.13	Controles existentes na área de Peneiramento Primário/Britagem Secundária.	39
Figura 2.14	Controles existentes na área de Peneiramento Secundário.	40
Figura 2.15	Controles existentes na área de Britagem Terciária.	43
Figura 3.1	Exemplo de dimensões do percurso do sistema de distribuição sobre cada silo.	46
Figura 3.2	Ciclo de alimentação dos silos.	47
Figura 3.3	Exemplo de situação em que um dos silos é bloqueado por nível alto.	47
Figura 3.4	Interface do software IDEAS®.	53
Figura 3.5	Janelas para parametrização de correias, britadores e silos no IDEAS®.	54
Figura 3.6	EC01 - Cenários considerados na simulação.	55
Figura 3.7	EC01 - Circuito de britagem terciária de S11D desenvolvido no software IDEAS®.	56
Figura 3.8	EC01 - Relação entre altura e volume acumulado dos silos.	57
Figura 3.9	EC01 - Taxas de alimentação simuladas.	58
Figura 3.10	EC01 - Níveis individuais dos silos - Condição de taxa de alimentação alta.	60
Figura 3.11	EC01 - Níveis individuais dos silos - Condição de taxa de alimentação baixa.	61

Figura 3.12	EC01 - Nível médio dos silos ativos.	62
Figura 3.13	EC01 - Tempo de operação dos alimentadores.	63
Figura 3.14	EC01 - Taxa média de saída (Somatório da taxa média de saída dos britadores).	64
Figura 3.15	EC01 - Produtividade média diária real das Usinas de S11D.	66
Figura 3.16	EC02 - Taxas de alimentação simuladas.	68
Figura 3.17	EC02 - Circuito de britagem secundária e peneiramento primário de S11D desenvolvido no software IDEAS®.	68
Figura 3.18	EC02 - Relação entre altura e volume acumulado dos silos.	69
Figura 3.19	EC02 - Níveis individuais dos silos - Condição de taxa de alimentação alta.	71
Figura 3.20	EC02 - Níveis individuais dos silos - Condição de taxa de alimentação baixa.	72
Figura 3.21	EC02 - Silos bloqueados por limite de nível - Condição de taxa de alimentação alta.	75
Figura 3.22	EC02 - Silos bloqueados por limite de nível - Condição de taxa de alimentação baixa.	76
Figura 3.23	EC02 - Taxa de saída (Somatório das linhas).	77
Figura 3.24	EC03 - Fluxograma do controle em <i>override</i> utilizado (Controlador PI para o <i>overflow</i> na parte superior e para o <i>underflow</i> na parte inferior).	80
Figura 3.25	EC03 - Circuito de peneiramento secundário de S11D desenvolvido no software IDEAS®.	81
Figura 3.26	EC03 - Relação entre altura e volume acumulado dos silos.	82
Figura 3.27	EC03 - Comparação de resultados em simulação.	84
Figura 3.28	EC03 - Diagrama de caixa para as taxas de <i>underflow</i>	85
Figura 3.29	EC03 - Comparação de resultados de velocidades dos alimentadores.	86
Figura 3.30	EC03 - Produção real na Usina 1 de S11D.	86
Figura 3.31	EC03 - Comparação de produção nas três usinas de S11D.	87
Figura 3.32	EC03 - Produção real nas Usinas 2 e 3 de S11D.	88
Figura 4.1	Curvas da PSD medida e predita para comparar os efeitos do número de graus de liberdade da função de quebra na acurácia do modelo para o conjunto de dados 1.	99
Figura 4.2	Curvas medidas e preditas para a PSD no Cenário 1. O mesmo conjunto de dados da calibração foi utilizado na validação.	101
Figura 4.3	Curvas medidas e preditas para a PSD no Cenário 2. Modelos calibrados com os conjuntos de dados (1 a 3) de Serra Leste.	103
Figura 4.4	Curvas medidas e preditas para a PSD no Cenário 2. Modelos calibrados com os conjuntos de dados (4 a 7) de S11D.	104
Figura 4.5	Curvas medidas e preditas para a PSD no Cenário 3 para conjuntos de dados de Serra Leste.	105

Figura 4.6	Curvas medidas e previstas para a PSD no Cenário 3 para conjuntos de dados de S11D.	106
Figura 4.7	Curvas medidas da PSD para $CSS = 35; 38; e 41$ mm. Curvas previstas da PSD para $CSS = 37; 39; e 40$ mm. Região próxima ao $P80$ em destaque.	107

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Parâmetros para o controle baseado em regras.	41
Tabela 3.1	EC01 - Dados dos alimentadores e correias transportadoras utilizadas na simulação.	58
Tabela 3.2	EC01 - Pontuação para os cenários - Condição 1: Taxa de alimentação alta.	65
Tabela 3.3	EC01 - Pontuação para os cenários - Condição 2: Taxa de alimentação baixa.	65
Tabela 3.4	EC02 - Cenários.	67
Tabela 3.5	EC02 - Dados dos alimentadores e correias transportadoras utilizadas na simulação.	70
Tabela 3.6	EC02 - Bloqueios da alimentação e silos - Condição 1: Taxa de alimentação alta.	73
Tabela 3.7	EC02 - Bloqueios da alimentação e silos - Condição 2: Taxa de alimentação baixa.	74
Tabela 3.8	EC02 - Ocorrências de ilhas.	75
Tabela 3.9	EC02 - Pontuação para os cenários - Condição 1: Taxa de alimentação alta.	78
Tabela 3.10	EC02 - Pontuação para os cenários - Condição 2: Taxa de alimentação baixa.	78
Tabela 3.11	EC03 - Parâmetros para o controle em <i>override</i>	81
Tabela 3.12	EC03 - Dados dos alimentadores e correias transportadoras utilizadas na simulação.	83
Tabela 4.1	Resumo dos parâmetros operacionais para cada conjunto de dados.	96
Tabela 4.2	Resumo dos valores de SSE e tempos de processamento usando a ECD e a ECI.	99
Tabela 4.3	Parâmetros calibrados no Cenário 1.	100
Tabela 4.4	Parâmetros calibrados no Cenário 2.	102
Tabela 4.5	Parâmetros calibrados no Cenário 3.	104
Tabela 4.6	Valores de <i>P80</i> no Cenário 4.	108

Lista de Siglas e Abreviaturas

ANN	Rede Neural Artificial (<i>Artificial Neural Network</i>)
APF	Abertura na Posição Fechada
CFD	Fluidodinâmica Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CLP	Controlador Lógico Programável
CSS	Abertura na Posição Fechada (<i>Closed Side Setting</i>)
DEM	Método dos Elementos Discretos (<i>Discrete Element Method</i>)
DGB	Quebra Discreta de Grãos (<i>Discrete Grain Breakage</i>)
EC01	Estudo de Caso 01
EC02	Estudo de Caso 02
EC03	Estudo de Caso 03
ECD	Estratégia de Calibração Direta
ECI	Estratégia de Calibração Indireta
FEM	Método dos Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
HFS	Simulação de Alta Fidelidade (<i>High Fidelity Simulation</i>)
HIL	<i>Hardware-In-the-Loop</i>
HPGR	Britador de Rolos de Alta Pressão (<i>High Pressure Grinding Rolls</i>)
ITV	Instituto Tecnológico Vale
LIC	Limite Inferior de Controle
LMaxF	Limite Máximo de Fator

LMinF	Limite Mínimo de Fator
LSC	Limite Superior de Controle
MPC	Controle Preditivo Baseado em Modelo (<i>Model Predictive Control</i>)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OPC	<i>Object linking and embedding for Process Control</i>
OSS	Abertura na Posição Aberta (<i>Open Side Setting</i>)
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PSD	Distribuição do Tamanho das Partículas (<i>Particle Size Distribution</i>)
RSM	Metodologia de Superfície de Resposta (<i>Response Surface Methodology</i>)
SAII	Soma dos Incrementos Absolutos da Entrada (<i>Sum of Absolute Input Increments</i>)
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SQP	Programação Quadrática Sequencial (<i>Sequential Quadratic Programming</i>)
SSE	Soma do Quadrado do Erro (<i>Sum of the Squared Error</i>)
TEC	Tempo de Espera de Correção

Lista de Símbolos

D	Diâmetro da abertura da malha da peneira
τ	Atraso de transporte
R_f	Porcentagem de material da alimentação que é menor que o tamanho de corte da peneira e que vai para o <i>overflow</i>
Φ	Parâmetro de calibração da função que define o elemento da matriz de quebra
δ	Parâmetro de calibração da função que define o elemento da matriz de quebra
σ	Parâmetro de calibração da função que define o elemento da matriz de quebra
i	Classe da PSD
j	Classe da PSD
\mathbb{R}	Conjunto dos números reais
ζ	Dureza do material
c	Elemento da matriz de classificação
b	Elemento da matriz de quebra
F_{50}	Tamanho em que 50% do material da alimentação é passante
F_{80}	Tamanho em que 80% do material da alimentação é passante
f	Fluxo de alimentação de material no britador
x	Fluxo de material dentro do britador
p	Fluxo de material que sai do britador como produto
C	Função de classificação

B	Função que define o elemento da matriz de quebra
E	Função de partição da peneira
\mathbf{B}	Função de quebra
S	Função de seleção
CL	Grupo de classes da PSD
DS	Grupo de conjuntos de dados
\mathbf{I}	Matriz identidade
m	Parâmetro que descreve a eficiência de separação na peneira
r	Amostra de \mathbf{v}
K_I	Ganho integrativo
LB	Limite inferior das variáveis de decisão
UB	Limite superior das variáveis de decisão
d_p	Média geométrica do diâmetro da partícula
w	Média geométrica do diâmetro da partícula
z	Média geométrica do diâmetro da partícula
n	Total de classes da PSD
$P80$	Tamanho em que 80% do material do produto é passante
K	Parâmetro da função de classificação
$\hat{P}80$	Tamanho em que 80% do material do produto predito é passante
X_{in}	Ponto de entrada de material no equipamento
X_{out}	Ponto de saída de material do equipamento
X_{CM}	Posição atual do cabeça móvel
\hat{P}	PSD do produto predito em passante acumulado
K_P	Ganho proporcional
F	PSD da alimentação em passante acumulado

f	PSD da alimentação em passante incremental
O	PSD do <i>overflow</i> em passante acumulado
o	PSD do <i>overflow</i> em passante incremental
P	PSD do produto em passante acumulado
p	PSD do produto em passante incremental
U	PSD do <i>underflow</i> em passante acumulado
u	PSD do <i>underflow</i> em passante incremental
SP	Referência (<i>set-point</i>)
F_{in}	Taxa de entrada
F_{out}	Taxa de saída
t	Tempo
T	Total de amostras de \mathbf{v}
θ	Vetor das variáveis de decisão
v	Velocidade linear da correia
\mathbf{v}	Vetor amostrado da velocidade linear da correia
V	Volume
W_F	Taxa de alimentação da peneira
W_O	Taxa do <i>overflow</i> da peneira
W_U	Taxa do <i>underflow</i> da peneira

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Contexto	20
1.2	Motivação	22
1.3	Objetivos	23
1.3.1	Objetivo Geral	23
1.3.2	Objetivos Específicos	23
1.4	Perguntas da Pesquisa	24
1.5	Delimitação da Pesquisa	24
1.6	Organização do Texto	25
2	Circuitos de Britagem	26
2.1	Equipamentos e componentes de circuitos de britagem	26
2.1.1	Transportadores de Correia	26
2.1.2	Alimentadores de Correia	28
2.1.3	Silos	29
2.1.4	Britadores Cônicos	31
2.1.5	Peneiras Vibratórias	35
2.2	Complexo minerário S11D	37
2.2.1	Peneiramento primário/Britagem secundária	39
2.2.2	Peneiramento Secundário	40
2.2.3	Britagem Terciária	41
3	Simulações dinâmicas para auxílio na tomada de decisão de alterações físicas e de controle do processo	45
3.1	Contexto	45
3.2	Formulação do Problema	46
3.3	Revisão bibliográfica	48
3.4	Metodologia	52
3.5	Estudo de Caso 01: Alocação de Britadores	55
3.5.1	Definições de cenários e parâmetros utilizados	55
3.5.2	Resultados e Discussão	58

3.6	Estudo de Caso 02: Alteração da velocidade máxima de translação do sistema de correia com cabeça móvel	67
3.6.1	Definições de cenários e parâmetros utilizados	67
3.6.2	Resultados e Discussão	70
3.7	Estudo de Caso 03: Substituição de estratégia de controle da velocidade dos alimentadores	79
3.7.1	Definições de cenários e parâmetros utilizados	79
3.7.2	Resultados e Discussão	83
4	Calibração de modelos de britadores cônicos	89
4.1	Contexto	89
4.2	Formulação do Problema	91
4.3	Revisão bibliográfica	92
4.4	Metodologia	94
4.5	Definições de cenários e parâmetros utilizados	96
4.6	Resultados e Discussão	98
4.6.1	Comparações entre a ECI e a ECD	98
4.6.2	Calibração/Validação usando a ECD	99
5	Conclusão	109
6	Trabalhos Futuros	111
	Referências Bibliográficas	112

1. Introdução

A pesquisa desenvolvida tem como tema a aplicação de simulação para auxílio na tomada de decisão em processos de cominuição mineral. São apresentados neste capítulo o contexto e a motivação deste tema, os objetivos, as hipóteses que foram formuladas e as delimitações da pesquisa, além de uma descrição da organização do texto.

1.1. Contexto

Representações virtuais podem ser usadas para reduzir custos e acelerar o processo de tomada de decisão por meio da simulação de equipamentos e processos. O trabalho desenvolvido busca mostrar aplicações dessas simulações em processos de mineração, com foco especificamente na etapa de cominuição, envolvendo equipamentos como britadores e peneiras e tratando da necessidade da distribuição eficiente de material entre silos. Nesse trabalho também é tratada a calibração dos parâmetros do modelo de britadores cônicos, etapa essencial para a simulação dos circuitos de britagem quando o foco da análise está nas dimensões das partículas que saem do equipamento.

Três situações reais da usina de S11D, pertencente à Vale e localizada no Pará, foram escolhidas para serem trabalhadas. Elas envolvem a tomada de decisão com relação a alterações físicas, de parâmetros e de estratégia de controle utilizadas em equipamentos de cominuição. Na primeira tomada de decisão estudada, alguns britadores de um conjunto são substituídos por outros de maior capacidade e a simulação é utilizada para mostrar se há uma melhor forma de substituição, dentre algumas opções possíveis de quantidade e localização. Na segunda situação, diante da possibilidade de aumento da velocidade do sistema de distribuição de material em um conjunto de silos, a simulação é usada para identificar se há benefícios nesse aumento e, havendo, encontrar a velocidade que melhor distribua o material nos silos, dentre algumas possibilidades. Por fim, a terceira situação é relacionada com a troca da estratégia de controle utilizada para definir a velocidade de um determinado conjunto de alimentadores, devido à ineficiência da estratégia atual. A simulação é utilizada para verificar se a nova estratégia, menos complexa que a atual, é capaz de permitir um melhor aproveitamento das capacidades nominais dos equipamentos.

As duas primeiras situações estudadas têm como foco em comum o impacto no comportamento do nível dos silos. No caso da troca de britadores, o impacto ocorre na alteração da taxa de saída de material dos silos. Dependendo de quantos britadores de maior capacidade forem utilizados e da localização escolhida para eles, a taxa média com a qual alguns dos silos são alimentados pode não ser suficiente para impedir seu esvaziamento por completo, trazendo consequências negativas para a produtividade. Já no caso da alteração de velocidade máxima do cabeça móvel, o impacto no nível dos silos está associado à alteração na entrada de material. O tempo que cada silo é alimentado está diretamente relacionado à velocidade com a

qual o sistema de distribuição realiza a translação, sendo que esta velocidade pode ser ajustada para cada silo, considerando diferenças entre as taxas dos equipamentos que retiram material deles e diferenças entre os comprimentos dos percursos do sistema de distribuição sobre eles. Tanto para a troca de britadores, quanto para a alteração da velocidade máxima de translação, a importância desta pesquisa está relacionada à mitigação dos impactos negativos que um comportamento instável do nível dos silos pode levar ao processo. Um deles ocorre quando algum silo atinge seu nível máximo, pois o sistema de distribuição deve parar de passar sobre ele. Dessa forma, silos que estão localizados após este silo bloqueado também deixam de receber alimentação, mesmo que seus níveis estejam baixos, situação essa que é chamada de formação de “ilha”. Outro impacto negativo ocorre quando algum dos silos atinge seu nível mínimo, pois é necessário desligar o alimentador que está na saída desse silo até que ocorra a recuperação para um certo nível de retorno. As situações descritas podem levar a uma redução ou interrupção temporária das taxas de material das áreas anteriores ou posteriores aos silos, fazendo com que a planta não consiga atingir sua capacidade nominal e reduza sua produtividade.

A terceira situação, que é a troca da estratégia de controle, tem como foco o impacto na constância da produção na capacidade nominal. Na prática, com a estratégia de controle que era utilizada, observavam-se variações indesejadas na taxa de material transportado que levavam à não utilização da capacidade esperada do equipamento. Essa situação impacta na produtividade da usina, fazendo com que a taxa produzida se distancie das metas definidas que consideram a utilização da capacidade nominal dos equipamentos. No caso dessa situação, em que há substituição de uma estratégia de controle por uma menos complexa, a importância dessa pesquisa está relacionada com a criação de evidências de que soluções simples, quando bem formuladas, são capazes de obter melhores resultados ao se comparar com técnicas de controle mais sofisticadas na camada de controle regulatório.

Diante das situações citadas e seus possíveis impactos, este trabalho busca desenvolver simulação dinâmica que entregue, para diferentes cenários, dados de taxas de material, nível, entre outros que se mostrarem necessários. Os dados fornecidos pelo simulador são utilizados para comparação entre cenários, servindo como auxílio para a tomada de decisão referente aos parâmetros que levem a uma melhor distribuição de material nos silos e melhor aproveitamento da capacidade nominal dos equipamentos.

Para as três situações estudadas nessa dissertação, e qualquer outra simulação dinâmica que se deseje realizar, é essencial que os equipamentos sejam representados com fidelidade no ambiente virtual. Por isso, essa dissertação também trata com detalhes a calibração dos parâmetros do modelo de britadores cônicos, um dos principais equipamentos de um circuito de cominuição. A importância dessa etapa da dissertação está relacionada à redução do tempo necessário para a calibração (em comparação com o método de tentativa e erro) e à obtenção de parâmetros mais precisos e acurados, devido a uma nova estratégia de calibração proposta nesse trabalho.

1.2. Motivação

Simulações de processos já são utilizadas na indústria mineral para projeto, análise, otimização, controle de sistemas de processamento, treinamento operacional e técnico ou desenvolvimento de pesquisa e tecnologia (HERBST *et al.*, 2002). Quando o modelo matemático utilizado reflete com precisão o equipamento ou processo real, a simulação auxilia na descoberta dos efeitos de alterações que nem sempre podem ser testadas facilmente no mundo real. Alterando os valores das propriedades da alimentação (umidade, por exemplo) ou as variáveis operacionais (capacidade do britador ou velocidade dos alimentadores, por exemplo), é possível avaliar o efeito dessas modificações no desempenho do circuito (NAPIER-MUNN & LYNCH, 1992).

Instalações modernas de processamento mineral são caras para construir e operar e, por isso, mesmo pequenas melhorias no desempenho podem se traduzir em reduções consideráveis de custos ou aumento de receita, principalmente em circuitos com grande produtividade (NAPIER-MUNN & LYNCH, 1992). Testar, por exemplo, as várias configurações para a alocação de britadores no ambiente real traria custos relacionados à compra antecipada dos equipamentos, mão de obra para instalação e tempo sem produção enquanto a troca é efetuada. Além disso, sendo necessário aguardar um mês, por exemplo, para coletar dados suficientes, ainda podem haver perdas caso a configuração testada seja de baixo desempenho. O uso de simuladores neste caso se mostra adequado pois o custo é reduzido, independe da disponibilidade dos equipamentos e não afeta a produção da empresa durante o período de testes, permitindo obter resultados referentes a um mês em poucas horas ou minutos de simulação. É ainda mais interessante quando essas melhorias ocorrem, por exemplo, apenas com alteração em estratégias de controle ou em um parâmetro como velocidade, já que podem não resultar em gastos com compra de equipamentos ou alterações físicas.

Para exemplificar os efeitos que atividades testadas previamente em simulação tem sobre a planta real, a Figura 1.1 mostra dados de produtividade para a britagem terciária da Usina 2 de S11D que estão relacionados a trabalhos anteriormente desenvolvidos por outros autores. No período antes da aplicação de melhorias, entre 01/10/2018 e 31/12/2018, a produtividade média foi de 443,2 t/h. Na Fase 1, entre 01/01/2019 e 15/02/2019, nota-se um aumento de 22,1%. Parte deste valor está diretamente relacionado a um aumento em 10% na velocidade rotacional do britador e a uma nova estratégia de controle da distribuição de material nos silos. Na Fase 2, no período de 16/02/2019 a 26/03/2019, foi implementada uma nova estratégia de controle para o sistema de cabeça móvel e para a escolha automática de quantos britadores devem estar em operação. Um aumento de 11,6% em relação ao período da Fase 1 foi verificado na Fase 2 e parte dele é justificado pelas estratégias citadas aqui e apresentadas com detalhes em Albuquerque *et al.* (2019), as quais foram desenvolvidas pela equipe multidisciplinar de S11D e do Instituto Tecnológico Vale (ITV) utilizando simulações como as propostas neste trabalho.

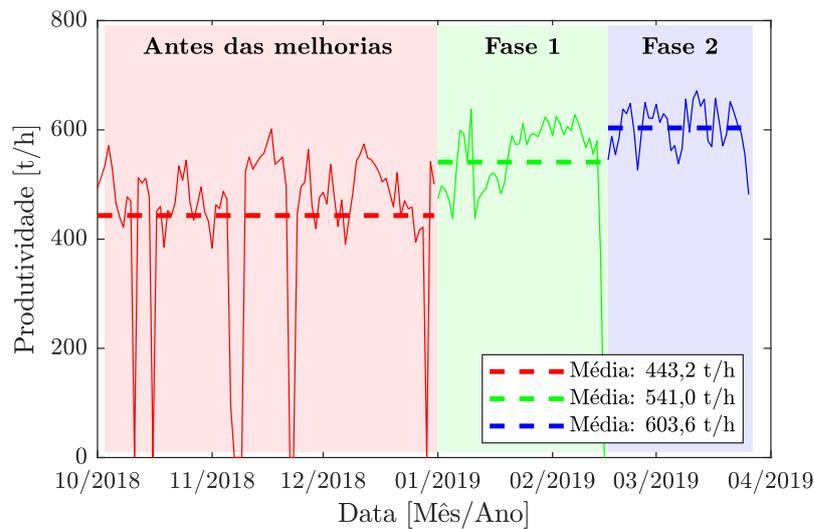


Figura 1.1: Produtividade na Usina 2 de S11D antes e após aplicações de melhorias.
 Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

1.3. Objetivos

O objetivo geral e os específicos desta pesquisa são apresentados a seguir.

1.3.1. Objetivo Geral

Realizar simulação dinâmica para auxílio na tomada de decisão referente a alterações físicas e de controle em processos de cominuição mineral que ocorrem em unidades de operação da Vale.

1.3.2. Objetivos Específicos

Partindo do objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Definir cenário de alocação de novos britadores que proporcione melhor distribuição de material nos silos quando feita a substituição de britadores de menor capacidade na usina de S11D;
- Definir velocidade máxima de translação para o sistema de correia com cabeça móvel de S11D que resulte em uma melhor distribuição de material nos silos;
- Definir estratégia de controle da velocidade dos alimentadores que permite um melhor aproveitamento da capacidade das correias transportadoras do peneiramento secundário de S11D;
- Utilizar conceitos de otimização para calibrar modelos que descrevam a distribuição granulométrica do produto de britadores cônicos de Serra Leste e S11D.

1.4. Perguntas da Pesquisa

Para o desenvolvimento desta pesquisa, quatro perguntas são formuladas:

- A simulação proposta permite definir a melhor configuração, dentre as testadas, para o problema de alocação de britadores terciários de S11D?
- A simulação proposta permite definir a melhor velocidade máxima de translação, dentre as testadas, do sistema de distribuição de material do peneiramento primário/britagem secundária de S11D?
- A simulação proposta permite definir a melhor estratégia, entre a proposta e a pré-existente, de controle da velocidade dos alimentadores do peneiramento secundário de S11D?
- A estratégia proposta permite calibrar modelos otimizados para a distribuição granulométrica do produto de britadores cônicos de Serra Leste e S11D?

1.5. Delimitação da Pesquisa

Para o problema de alocação de britadores, a pesquisa é baseada em equipamentos do complexo minerário S11D da Vale, no Pará, e as análises são restritas unicamente ao circuito de britagem terciária, ou seja, os demais equipamentos da planta de processamento mineral são desprezados. O circuito composto por quatro britadores cônicos de capacidade de 500 t/h pode ter dois, três ou todos os quatro equipamentos trocados por outros exclusivamente de capacidade igual a 750 t/h. Gastos com compra de equipamentos ou mão de obra para a troca não são levados em consideração na análise. Além disso, não é considerada a possibilidade de alteração na lógica existente ou em parâmetros de equipamentos.

O problema de definição da velocidade máxima para o sistema de distribuição de material também é baseado em S11D, porém as análises se restringem ao circuito de britagem secundária, incluindo o peneiramento primário, responsável por alimentar os britadores. A velocidade máxima do sistema de alimentação operando na usina no momento do início da pesquisa é de 5,84 m/min e, conforme orientação dos responsáveis pela área, pode ser elevada até o valor máximo de 11,00 m/min. Novamente, não são considerados gastos financeiros ou possibilidade de alterações de lógicas existentes ou outros parâmetros de equipamentos.

Já o problema de definição de estratégia de controle para os alimentadores é restrito à área de peneiramento secundário de S11D. A comparação é exclusivamente entre a estratégia de controle pré-existente, baseada em regras, e a estratégia mais simples proposta, um controle em *override*. Gastos financeiros e a possibilidade de alterações de parâmetros dos equipamentos não são considerados.

Com relação à calibração dos parâmetros do modelo de britadores cônicos, a pesquisa se limita aos dados fornecidos por S11D e Serra Leste, outro complexo minerário pertencente à

Vale e no Pará. Outra limitação é método de otimização utilizado, sendo apenas a Programação Quadrática Sequencial (*Sequential Quadratic Programming*, SQP). Outros métodos foram testados, porém com menor desempenho e por isso descartados. A escolha do método não é abordada nessa pesquisa.

1.6. Organização do Texto

O presente trabalho traz no Capítulo 2 um referencial teórico apresentando detalhes sobre os equipamentos comumente utilizados em circuitos de britagem e uma visão geral sobre o circuito de britagem de S11D. Em seguida, o Capítulo 3 vem com os estudos de caso envolvendo a aplicação da simulação dinâmica para auxílio na tomada de decisão de alterações físicas e de controle do processo. No Capítulo 4 é apresentado o trabalho desenvolvido sobre a calibração dos parâmetros do modelo de britador cônico. Por fim, são apresentadas as conclusões dessa dissertação no Capítulo 5 e, no Capítulo 6, os trabalhos futuros.

Alguns resultados apresentados nesse documento já foram publicados pelo autor em formato de relatório técnico ou artigo. São eles:

- Relatório Técnico no ITV: *Simulação dos efeitos de substituição dos britadores CH660 por britadores CH860 na britagem terciária de S11D* (DUARTE *et al.*, 2019);
- Relatório Técnico no ITV: *Simulação dinâmica da área 2012 de S11D: Suporte à decisão na alteração da lógica de controle e repotenciamento do cabeça móvel* (DUARTE *et al.*, 2020a);
- Artigo no XXIII Congresso Brasileiro de Automática: *Ganhos de produtividade em um circuito de britagem devido à aplicação de controle override* (DUARTE *et al.*, 2020b).

Além disso, os simuladores desenvolvidos e descritos nesse documento serviram como base para desenvolver os trabalhos a seguir:

- Relatório Técnico no ITV: *Implantação de controlador fuzzy de taxa no peneiramento secundário de S11D* (VARGAS *et al.*, 2020);
- Relatório Técnico no ITV: *Procedimentos para integração irace-MATLAB: Calibrando parâmetros de heurísticas* (BENETELI *et al.*, 2021).

Existem ainda trabalhos em desenvolvimento a serem publicados nos próximos meses (os títulos podem sofrer alteração até a publicação):

- Artigo para revista: *Calibration and validation of a cone crusher model for product PSD prediction with industrial data*;
- Artigo para revista: *Cone crusher purchase evaluation in a mineral processing plant based on dynamic simulations*.

2. Circuitos de Britagem

A cominuição, isto é, a redução do tamanho das partículas do material, e a classificação por tamanho são etapas essenciais na mineração. Na natureza, minerais de interesse comercial costumam estar combinados com outros minerais em grandes rochas, sendo necessário reduzir o tamanho delas de forma a permitir o acesso aos minerais separadamente. Normalmente, a concentração do mineral de interesse nas rochas maiores é baixa. Dessa forma, é preciso extrair grande quantidade desse agregado para recuperar quantidades suficientes do mineral de interesse para tornar a operação comercialmente viável (GUPTA & YAN, 2016).

Os circuitos de britagem, uma das formas pela qual a cominuição é realizada, são compostos por transportadores e alimentadores de correia, silos, britadores e peneiras. O material vindo das lavras é enviado para os britadores primários e, em seguida, para os britadores secundários e as peneiras. A parte do material de maior granulometria após o peneiramento segue para a britagem terciária, enquanto que a parte de menor granulometria segue para a próxima etapa da produção. Nos casos em que há circuito fechado de britagem, o material que seguiu para a britagem terciária retorna para o circuito, passando por novo peneiramento (EVERTSON, 2000).

Com o objetivo de fornecer um referencial teórico para as atividades apresentadas nessa dissertação, os equipamentos normalmente utilizados e o circuito de britagem de S11D, local de estudo desse trabalho, são descritos nas seções subseqüentes.

2.1. Equipamentos e componentes de circuitos de britagem

São apresentadas nessa seção algumas características e parâmetros dos equipamentos e componentes em que essa dissertação se aplica. Suas representações matemáticas também são descritas, já que são nelas que as simulações se baseiam.

2.1.1. Transportadores de Correia

Transportadores de correia são utilizados com o propósito de manipular materiais por meio de um fluxo contínuo, normalmente levando o material da saída de um determinado processo para a entrada de outro. A correia de borracha se apoia sobre diversos rolos e desloca o material com velocidade linear proporcional à velocidade de rotação do motor de acionamento. Esses transportadores, com alguns de seus componentes representados na Figura 2.1, podem ser dispostos em perfis horizontais, aclives ou declives, com a inclusão de curvas côncavas, convexas ou horizontais, em qualquer combinação. Os transportadores podem ser do tipo unidirecional, permitindo um sentido único de deslocamento do material, ou bidirecional, em que o material pode ser transportado em ambos os sentidos por meio da reversão de sentido de rotação do motor de acionamento.

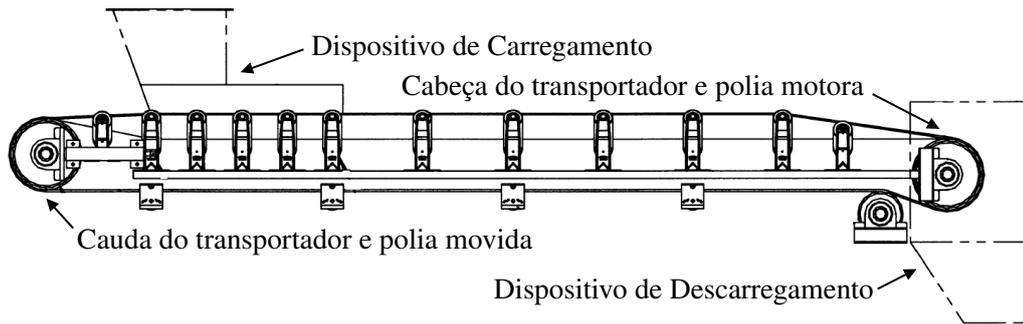


Figura 2.1: Correia transportadora e alguns de seus componentes.
 Fonte: Adaptado de Conveyor Equipment Manufacturers Association (2007).

Existem diversos arranjos para carregamento e descarregamento do material no transportador. Um dispositivo de carregamento é utilizado, principalmente, para permitir que o material seja posicionado centralizado sobre a correia, evitando desgastes e consumo excessivo pelo motor, além de derramamento de material. No método mais simples de descarga, o material passa sobre a polia da cabeça, caindo em uma pilha. Com a adição de um dispositivo de descarga, o material pode ser direcionado para onde for desejado, bem como ser despejado em outra correia. Nos casos em que são necessários vários pontos específicos de descarga, *trippers* — dispositivos móveis ou fixos posicionados sobre os transportadores — podem ser utilizados para direcionar o material para vários pontos em qualquer dos lados da correia, de forma contínua ou intermitente (CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2007). Outro método utilizado para vários pontos de descarga é a translação de cabeça móvel, em que o material continua sendo despejado sobre a polia da cabeça, porém a cabeça do transportador pode ser transladada de forma a ser posicionada onde desejado. Alguns desses exemplos de disposições citados são apresentados nas Figuras 2.2 e 2.3.

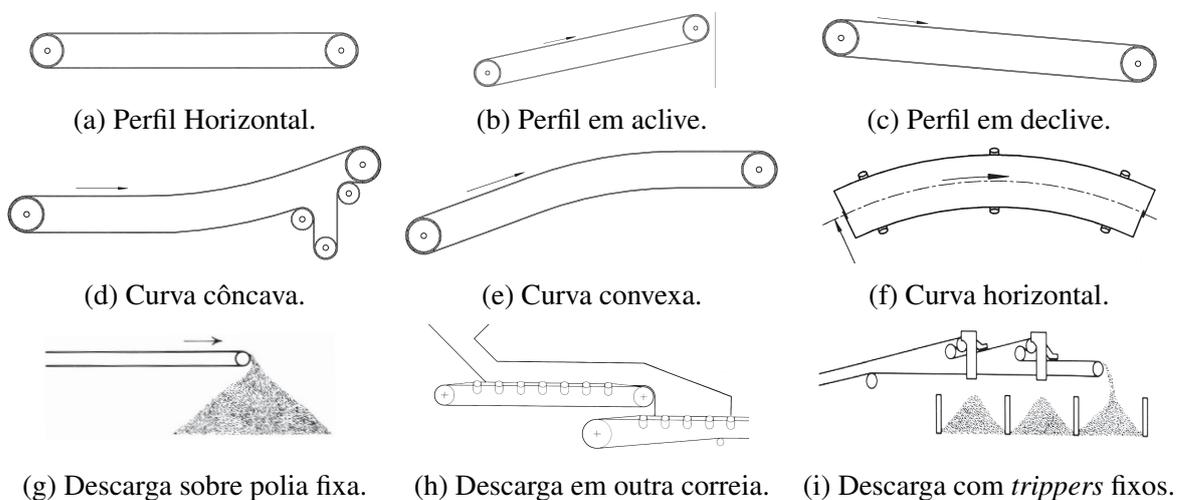


Figura 2.2: Exemplos de disposições de correias.
 Fonte: Adaptado de Conveyor Equipment Manufacturers Association (2007).

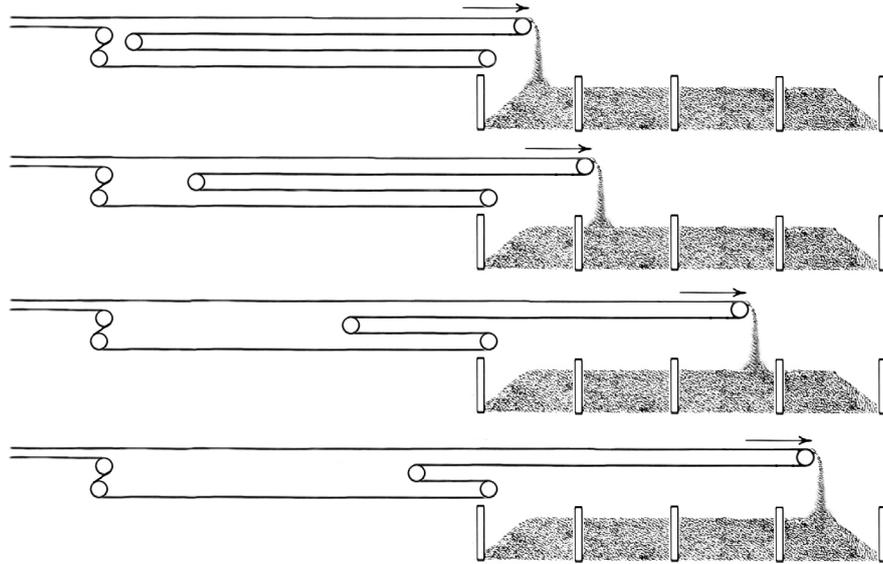


Figura 2.3: Correia Transportadora com Translação de Cabeça Móvel (Cabeça móvel representada em diferentes posições).

Fonte: Adaptado de Conveyor Equipment Manufacturers Association (2007).

Em simulações nas quais apenas o tempo de deslocamento de material sobre a correia é relevante, esses transportadores podem ser representados como um atraso de transporte associado ao tempo que o material leva para percorrer a correia. Portanto, a taxa de saída F_{out} no tempo t é igual à taxa de entrada F_{in} atrasada em τ unidades de tempo, como mostrado na Equação 2.1 (DRAGOMIR *et al.*, 2009). O tempo τ é calculado pela Equação 2.2 e está relacionado ao ponto de entrada X_{in} de material na correia (local do dispositivo de carregamento), ao ponto de saída X_{out} (local do dispositivo de descarregamento) e à velocidade linear da correia v em regime (em situações que a dinâmica de partida e parada do motor possa ser desconsiderada). Transportadores de correia normalmente trabalham com v fixa e, portanto, τ fixo. A taxa F_{in} é igual à taxa de saída do equipamento à montante.

$$F_{out}(t) = F_{in}(t - \tau). \quad (2.1)$$

$$\tau = \frac{X_{out} - X_{in}}{v}. \quad (2.2)$$

2.1.2. Alimentadores de Correia

Alimentadores são utilizados quando é necessário realizar um controle de taxa do material transportado, particularmente quando equipamentos como peneiras, transportadores de correias ou britadores são alimentados por material armazenado em moegas, câmaras, silos ou pilhas. Um dos tipos de alimentadores normalmente utilizados na mineração é o alimentador de correia, que consiste em uma transportador de correia curto posicionado sob as instalações

de armazenamento de material (CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2007). Enquanto as correias transportadoras trabalham com velocidade fixa, os alimentadores possuem velocidade variável de forma a realizar o controle da taxa de material que alimenta outros equipamentos.

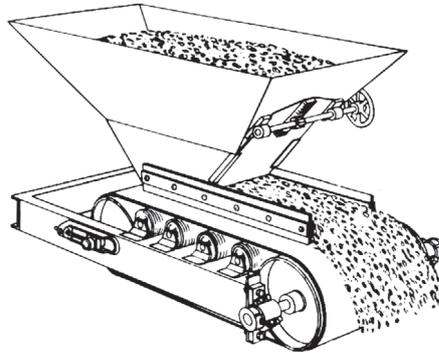


Figura 2.4: Representação de alimentador de correia e seu dispositivo de carregamento.
Fonte: Conveyor Equipment Manufacturers Association (2007).

Os alimentadores podem ser representados da mesma forma que as correias transportadoras em simulações, mantendo a Equação 2.1 como a relação entre taxa de entrada e de saída. Porém, considera-se $v(t)$, isto é, velocidade linear variante no tempo, resultando em $\tau(t)$ na Equação 2.2. As dimensões do alimentador (largura de correia, dispositivo de carregamento, entre outras) definem a capacidade nominal de transporte do equipamento quando operando em velocidade linear nominal. Considerando que as características do material se mantenham, a taxa de entrada (F_{in}) reduz na mesma proporção caso a velocidade linear utilizada seja menor que o valor nominal.

2.1.3. Silos

Silos são utilizados para o armazenamento de material de forma a permitir uma conexão entre operações que possuem vazões diferentes, fazendo com que a parada momentânea de uma operação anterior possa ocorrer sem afetar a produção da operação seguinte. A taxa de entrada de material (F_{in}) no silo é definida pela operação à montante e a taxa de saída (F_{out}) é definida pelo alimentador que está em sua saída.

Em simulações com o objetivo de aplicação de controle de nível, o tanque pode ser modelado conforme a Equação (2.3), em que a taxa de entrada de material é considerada um distúrbio e a taxa de saída de material deve ser ajustada de forma a não perturbar o processo a jusante e manter o volume (V) de material no silo dentro de uma determinada faixa (SBARBARO & ORTEGA, 2007). O nível, por sua vez, é calculado em função do volume. Devido a possíveis geometrias irregulares dos silos, como as mostradas na Figura 2.5 e que têm como consequência uma relação não linear entre o nível em altura e o volume de material, é necessário encontrar a função que descreve a relação entre as duas variáveis para sua representação em simulações.

A Figura 2.6 apresenta um exemplo de relação entre volume e altura de material no silo da britagem terciária de S11D.

$$\frac{dV}{dt} = F_{in} - F_{out}. \quad (2.3)$$

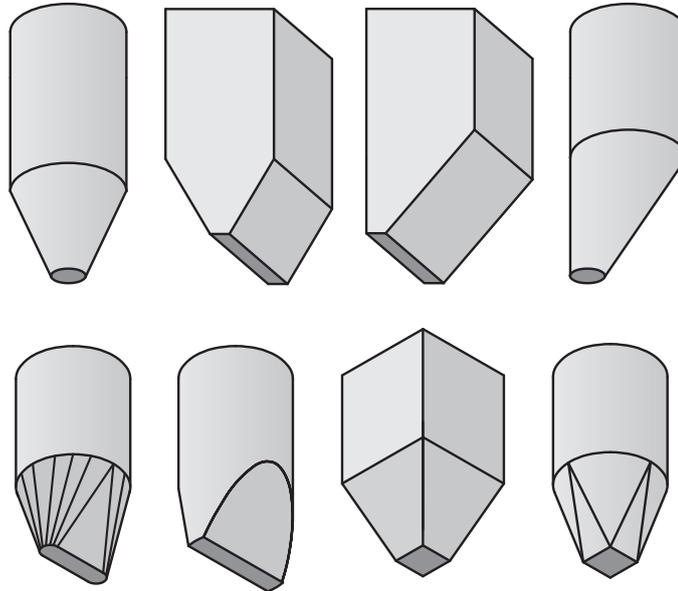


Figura 2.5: Exemplos de geometrias irregulares de silos.
Fonte: Adaptado de Schulze (2008).

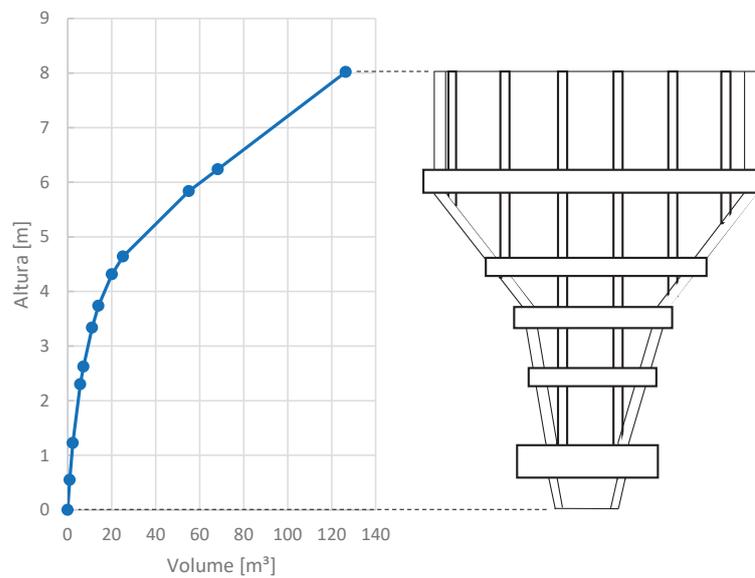


Figura 2.6: Relação entre altura e volume à esquerda. Desenho esquemático do silo à direita.
Fonte: Adaptado de Albuquerque *et al.* (2019).

2.1.4. Britadores Cônicos

Britadores são utilizados para reduzir a dimensão das partículas de material. Dentre vários tipos, destaca-se o britador cônico, que normalmente é utilizado da etapa de britagem secundária em diante. Esse tipo de britador trabalha realizando uma ação de compressão de duas peças de aço contra a rocha. O movimento do manto que realiza a ação de esmagamento pode ser visto na Figura 2.7, sendo ele realizado devido à sua rotação excêntrica. Quando o manto se move para distante do côncavo durante seu ciclo de giro, a rocha se move e desce até ser presa novamente entre o manto e o côncavo no próximo ciclo, resultando em uma redução nas dimensões da partícula. O processo se repete até que o tamanho da rocha britada seja menor que a Abertura na Posição Aberta (*Open Side Setting*, OSS) no fundo do britador, momento em que o material é considerado produto e sai do equipamento (GUPTA & YAN, 2016). A amplitude dos golpes excêntricos realizados pelo britador sobre o material é encontrada realizando a diferença entre a OSS e a Abertura na Posição Fechada (*Closed Side Setting*, CSS), que são as duas medidas apresentadas na Figura 2.7. A CSS pode ser alterada pelos operadores para obter a granulometria desejada do produto, inclusive quando é necessário algum ajuste devido ao desgaste do revestimento do manto, sendo que alguns equipamentos só permitem esse ajuste parado e sem carga, enquanto outros permitem a alteração durante a utilização do britador com carga.

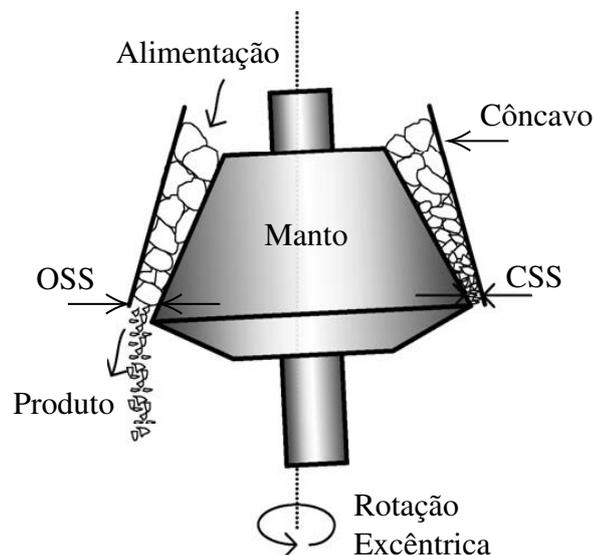


Figura 2.7: Britador cônico.
Fonte: Adaptado de Asbjörnsson *et al.* (2012).

Em simulações, para representação das funções de quebra e de classificação realizadas por um britador cônico, o diagrama de blocos da Figura 2.8 pode ser utilizado. Nele, o fluxo de alimentação de material é representado por f ; o fluxo de material dentro do britador, que consiste no fluxo de alimentação somado ao material circulante pré-existente, é representado por x ; e as funções de quebra e classificação são representadas por \mathbf{B} e \mathbf{C} , respectivamente.

Na função **C**, o material com tamanho de partícula abaixo dos valores de classificação deixa o britador como produto (**p**) e o material restante vai para a função **B**. O total de classes (n_f) nas quais o fluxo de material é dividido define a dimensionalidade de **x**, **f** e **p** ($\mathbf{x}, \mathbf{f}, \mathbf{p} \in \mathbb{R}^{n_f}$). Esse valor é determinado pelo número de peneiras usadas nos testes de laboratório para definir a Distribuição do Tamanho das Partículas (*Particle Size Distribution*, PSD) do fluxo de material. Na teoria, a razão entre uma classe e a próxima deve ser $\sqrt{2}$, o que significa que a diferença entre os tamanhos da abertura das peneiras e, conseqüentemente, a diferença entre o tamanho das partículas entre classes adjacentes deve também ser $\sqrt{2}$. No entanto, na prática, o número de classes e seus valores são definidos de acordo com os tamanhos de abertura de peneira disponíveis no momento da análise (KING, 2001).

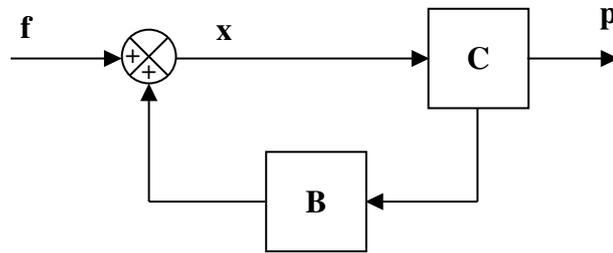


Figura 2.8: Diagrama de blocos da representação do modelo do britador cônico.
Fonte: Adaptado de Napier-Munn *et al.* (1996).

As análises podem ser realizadas com base nos valores nominais da abertura das peneiras (D_i) e dos valores do passante acumulado da PSD da alimentação (F_i), onde i indica a classe de tamanho, $i = 1, \dots, n_f$. Porém, para ser utilizado no modelo de Whiten (1972), esses valores precisam ser convertidos em média geométrica do diâmetro das partículas (d_{pi}) e em passante incremental da PSD da alimentação (f_i) usando as Equações (2.4) e (2.5). Na Equação (2.4), para $i = n_f$, tem-se $D_{i+1} = \frac{D_i}{\sqrt{2}}$. Essa etapa de conversão é desnecessária se f_i e d_{pi} forem medidos diretamente.

$$d_{pi} = \sqrt{D_i \times D_{i+1}}, \quad i < n_f. \quad (2.4)$$

$$f_i = \begin{cases} F_i - F_{i+1}, & \text{para } i < n_f \\ F_i, & \text{para } i = n_f \end{cases}. \quad (2.5)$$

O modelo em estado estacionário apresentado por Whiten (1972) parte do balanço de massa por classe de tamanho do material aplicado a um britador cônico (SBÁRBARO & DEL VILLAR, 2010):

$$\frac{d\mathbf{m}(t)}{dt} = \mathbf{f}(t) - \mathbf{p}(t) - \zeta(t) (\mathbf{S} - \mathbf{BS}) \mathbf{m}(t), \quad (2.6)$$

onde ζ representa a dureza do material, **S** é uma matriz diagonal que representa a taxa de quebra específica, **B** é chamado função de quebra e **m** representa o vetor de massa no britador cônico.

O produto \mathbf{p} é considerado proporcional ao vetor de massa, isto é, $\mathbf{p} = \mathbf{Qm}$, em que \mathbf{Q} é uma matriz diagonal que representa cada elemento na taxa de descarga específica e que já leva em consideração a dureza ζ na proporcionalidade.

A PSD do produto é determinada pela PSD da alimentação e as funções de classificação e quebra. A solução em estado estacionário para a Equação (2.6) é obtida igualando o lado esquerdo à zero e expressando \mathbf{p} como uma função de \mathbf{f} (SBÁRBARO & DEL VILLAR, 2010). Após manipulações algébricas, de acordo com Whiten (1972), a PSD incremental do fluxo de produto (\mathbf{p}) é dada por

$$\mathbf{p} = (\mathbf{I} - \mathbf{C})(\mathbf{I} - \mathbf{BC})^{-1} \mathbf{f}, \quad (2.7)$$

onde \mathbf{I} é uma matriz identidade de dimensões apropriadas, \mathbf{C} é a matriz de classificação definida como $\mathbf{S}(\mathbf{S} + \mathbf{Q})^{-1}$ e \mathbf{B} é a matriz de quebra. A PSD acumulada do produto P_i é calculada como a soma da PSD incremental do produto p_i , de $i = 1$ até a classe desejada para P :

$$P_i = \begin{cases} 100, & \text{para } i = 1 \\ P_{i-1} - p_{i-1}, & \text{para } i > 1 \end{cases}. \quad (2.8)$$

No modelo de britador cônico de Whiten (1972), a função de classificação representa a probabilidade do material de uma dada classe de dimensão se tornar produto ou seguir para a quebra. A Figura 2.9 mostra como a função de classificação é determinada em termos dos parâmetros K_1 , K_2 e K_3 e a Equação (2.9) mostra a representação algébrica da função de classificação, na qual c_{ii} é o i -ésimo elemento de uma matriz diagonal \mathbf{C} ($\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{n_f \times n_f}$) (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996). Se d_{pi} é menor ou igual a K_1 , então as partículas nessa classe não são quebradas novamente e deixam o britador cônico como produto. Se d_{pi} é maior ou igual a K_2 , então a classe de partículas segue para quebra adicional. K_3 descreve o formato da função de classificação, definindo a probabilidade de quebra para as partículas das classes intermediárias.

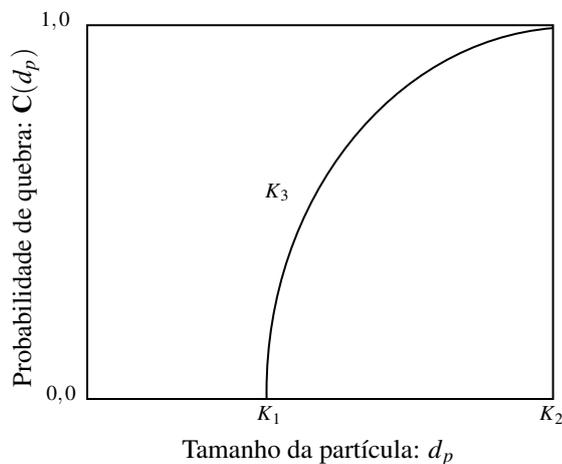


Figura 2.9: Representação esquemática da função de classificação.
Fonte: Adaptado de Napier-Munn *et al.* (1996).

$$c_{ii} = \begin{cases} 0, & \text{para } d_{pi} \leq K_1 \\ 1 - \left(\frac{K_2 - d_{pi}}{K_2 - K_1}\right)^{K_3}, & \text{para } K_1 < d_{pi} < K_2 \\ 1, & \text{para } d_{pi} \geq K_2 \end{cases} \quad (2.9)$$

De acordo com Napier-Munn *et al.* (1996), as relações lineares entre os parâmetros K_1 a K_3 e os parâmetros de operação do britador cônico são dadas por:

$$K_1 = \alpha_0 + \alpha_1 CSS - \alpha_2 TPH + \alpha_3 F80 + \alpha_4 LLEN, \quad (2.10)$$

$$K_2 = \beta_0 + \beta_1 CSS + \beta_2 TPH + \beta_3 F80 - \beta_4 LHR + \beta_5 ET, \quad (2.11)$$

$$K_3 = \gamma_0, \quad (2.12)$$

onde CSS é abertura na posição fechada (mm); TPH é a taxa de material seco (t/h); $F80$ é o tamanho em que 80% do material da alimentação é passante (mm); $LLEN$ é o comprimento da face do revestimento do manto (mm); LHR é a idade do revestimento (horas); ET é a amplitude dos golpes excêntricos (mm), resultado da diferença entre OSS e CSS ; e α_0 a α_4 , β_0 a β_5 e γ_0 são os parâmetros de calibração da função de classificação do modelo. Os sinais dos parâmetros α_2 e β_4 mostram as tendências esperadas com as variáveis relacionadas à taxa de produção e ao conjunto do britador (NAPIER-MUNN *et al.*, 1996).

De acordo com King (2001), o parâmetro K_1 varia entre 0,5 e 0,95 e K_2 varia entre 1,7 e 3,5. Normalmente, K_3 é aproximadamente igual a 2, podendo variar entre 1 e 3.

No modelo de britador cônico de Whiten (1972), a função de quebra representa a probabilidade das partículas de uma classe no fluxo de material serem quebradas em um tamanho menor. A Equação (2.13) é utilizada para definir os termos da matriz triangular inferior \mathbf{B} ($\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n_f \times n_f}$) e representa a fração de partículas menor que a classe de tamanho w , resultante da quebra de partículas da classe de tamanho z , que ocorre em cada ciclo de alimentação. Os elementos de \mathbf{B} são calculados como mostrado na Equação (2.14), na qual b_{ij} é o elemento na linha i e coluna j da matriz \mathbf{B} e dá a porcentagem de partículas do tamanho de classe j que pertencerão à classe de partículas i depois da quebra e $B(d_{pi}; d_{pj})$ é calculado como mostrado na Equação (2.13). A soma dos elementos de cada coluna de \mathbf{B} deve ser igual a 1.

$$B(w; z) = \Phi\left(\frac{w}{z}\right)^\delta + (1 - \Phi)\left(\frac{w}{z}\right)^\sigma. \quad (2.13)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} B(d_{pi}; d_{pj}) - B(d_{pi+1}; d_{pj}), & \text{para } i \neq j \\ 1 - B(d_{pi+1}; d_{pj}), & \text{para } i = j \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\sum_{j=1}^{n_f} b_{ij} = 1, \quad \forall i, \quad 1 \leq i \leq n_f. \quad (2.15)$$

Na Equação (2.13), Φ denota a fração de partículas resultantes na fração mais fina. δ

e σ descrevem as partículas maiores produzidas pela tensão de tração e as partículas menores produzidas pela intensa tensão de compressão, respectivamente (KING, 2001). Os parâmetros Φ , δ e σ dependem da aplicação particular e devem ser calibrados. De acordo com King (2001), para britadores do tipo padrão, os valores de δ e σ devem ser iguais a 0,5 e 4,5, respectivamente.

2.1.5. Peneiras Vibratórias

Peneiras são equipamentos utilizados para classificar o material com relação ao tamanho, submetendo as partículas à passagem pela superfície de uma tela com aberturas de tamanho conhecido. Como representado na Figura 2.10, as partículas da alimentação que conseguem passar pelas aberturas da tela e, portanto, que possuem tamanho menor que o da abertura, formam o fluxo de material chamado de *underflow*. As demais partículas alimentadas e que não passam pelas aberturas formam o fluxo de material chamado de *overflow*. Para conseguir uma separação eficiente, as partículas individuais requerem muitas oportunidades para passar pelas aberturas, pois cada partícula de tamanho inferior deve atingir uma parte desobstruída da superfície da tela e a partícula deve ser orientada corretamente para se encaixar na abertura (JANSEN & GLASTONBURY, 1968). Isto quer dizer que, quando o peneiramento não ocorre de forma eficiente, partículas de tamanho menor que a abertura da peneira podem seguir erroneamente para o *overflow*. As peneiras vibratórias, como o próprio nome indica, realiza a vibração das telas para movimentar as partículas e direcioná-las a passar sobre as aberturas, além de direcionar o material com maior tamanho para fora da superfície da tela da peneira (KING, 2001).

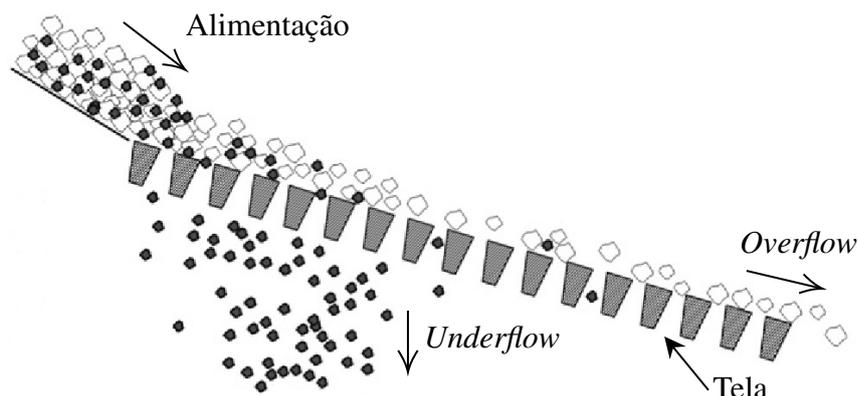


Figura 2.10: Representação de uma peneira e seus fluxos de material.
Fonte: Adaptado de Gupta e Yan (2016).

Em simulações, assim como para os britadores cônicos, os modelos para as peneiras vibratórias podem ser desenvolvidos com base nos valores nominais da abertura das peneiras (D_i) usadas na análise granulométrica realizada em laboratório e dos valores do passante acumulado da PSD da alimentação (F_i) e, logo após, convertidos em média geométrica do diâmetro

das partículas (d_{pi}) e em passante incremental da PSD da alimentação (f_i), usando as mesmas Equações (2.4) e (2.5) apresentadas na seção sobre o britador cônico. King (2001) afirma que uma descrição mais realística do desempenho de um equipamento de classificação é fornecida por sua função de partição E (também chamada de função de classificação) e que, uma vez que essa função é conhecida, o passante incremental da PSD do *overflow* (o_i) e do *underflow* (u_i) podem ser calculados por um simples balanço de massa sobre os sólidos na classe de tamanho i , resultando nas Equações (2.16) e (2.17):

$$o_i = \frac{Ec_i f_i}{\sum_{j=1}^{n_f} (Ec_j f_j)} 100, \quad (2.16)$$

$$u_i = \frac{(1 - Ec_i) f_i}{\sum_{j=1}^{n_f} [(1 - Ec_j) f_j]} 100. \quad (2.17)$$

Ec_i é resultante de uma correção na função de partição E_i . E_i é definida como a fração de massa de material da alimentação no intervalo de tamanho i que sai da peneira pelo *overflow*. Uma das formas de descrever essa função de classificação é utilizando a função apresentada na Equação (2.18) (NAPIER-MUNN & LYNCH, 1992), em que m é o parâmetro que descreve a eficiência da separação na peneira e $F50$ é o tamanho de abertura de tela em que 50% das partículas da alimentação é passante, também conhecido como tamanho de corte da peneira. Para levar em consideração a que a eficiência da peneira pode ser abaixo de 100%, isto é, que nem todo material menor que o tamanho de corte segue para o *underflow*, Napier-Munn e Lynch (1992) citam que o método mais comum de correção é assumindo uma mesma proporção de correção para todos os tamanhos. Dessa forma, a correção pode ser feita utilizando a Equação (2.19), em que R_f é a porcentagem de material menor que o tamanho de corte e que vai para o *overflow*.

$$E_i = \frac{\exp\left(m \frac{f_i}{F50}\right) - 1}{\exp\left(m \frac{f_i}{F50}\right) - \exp(m) - 2}. \quad (2.18)$$

$$Ec_i = E_i + \frac{R_f}{100} (1 - E_i). \quad (2.19)$$

Os valores da PSD acumulada do *overflow* (O_i) e do *underflow* (U_i) são calculados como a soma da respectiva PSD incremental, de $i = 1$ até a classe desejada:

$$O_i = \begin{cases} 100, & \text{para } i = 1 \\ O_{i-1} + o_{i-1}, & \text{para } i > 1 \end{cases}, \quad (2.20)$$

$$U_i = \begin{cases} 100, & \text{para } i = 1 \\ U_{i-1} + u_{i-1}, & \text{para } i > 1 \end{cases}. \quad (2.21)$$

Com relação às taxas de material no *overflow* (W_O) e no *underflow* (W_U), elas são determinadas utilizando a taxa da alimentação (W_F) e a E_c (KING, 2001):

$$W_O = \sum_{i=1}^{n_f} (E_{c_i} W_F f_i). \quad (2.22)$$

$$W_U = \sum_{i=1}^{n_f} [(1 - E_{c_i}) W_F f_i]. \quad (2.23)$$

2.2. Complexo minerário S11D

O complexo minerário S11D, localizado no município de Canaã dos Carajás, Pará, apresenta como principais características o sistema *truckless*, em que caminhões fora de estrada são substituídos por correias transportadoras, e o alto nível de teor de ferro no minério a ser produzido, eliminando etapas de concentração. Dessa forma, o beneficiamento é realizado apenas com umidade natural, sendo composto por etapas de peneiramento e britagem. Essa seção da dissertação traz detalhes sobre S11D que são fundamentais para o desenvolvimento dos simuladores, sendo que os fluxogramas apresentados a partir daqui utilizam as representações da Figura 2.11.

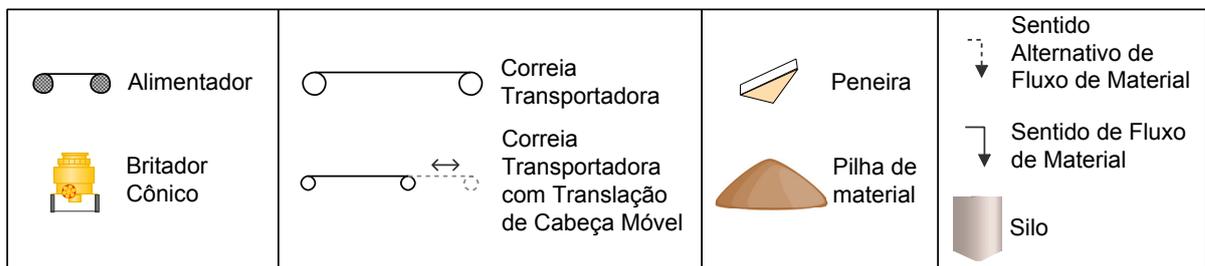


Figura 2.11: Legenda para os Fluxogramas.
Fonte: O autor.

O minério extraído da mina passa pela etapa de britagem primária e vai para pilhas pulmão, sendo depois transportado por correias para seis silos da usina de beneficiamento. O fluxograma da Figura 2.12 traz uma representação simplificada a partir da correia transportadora com translação de cabeça móvel que faz a distribuição de material nos silos citados. Na usina, a próxima etapa é o peneiramento primário do material, que ocorre com seis peneiras. O *overflow* deste peneiramento segue para a etapa de britagem secundária, com um britador para cada peneira. O produto dos britadores se junta ao material que vem do *underflow* do peneiramento. A partir daí, o material é separado em três linhas com características semelhantes, sendo o material de dois conjuntos britadores/peneiras direcionado para cada uma dessas linhas.

Em cada uma das linhas, o material passa primeiramente pelo pátio de regularização e, logo após, é enviado para uma segunda etapa de peneiramento. De acordo com a necessidade, o material pode seguir uma rota alternativa e ser enviado diretamente para o peneiramento. O

peneiramento secundário é composto por dez silos e peneiras cujo *underflow* já é considerado produto e segue para o pátio de estocagem, para posterior carregamento nos vagões de trem. O *overflow* deste peneiramento é distribuído em quatro silos pelo sistema de correia transportadora com translação de cabeça móvel e passa por uma terceira etapa de britagem para se adequar ao tamanho desejado. O material que passa por cada um dos quatro britadores da britagem terciária é chamado de carga circulante, pois se mantém circulando e retorna ao peneiramento secundário.

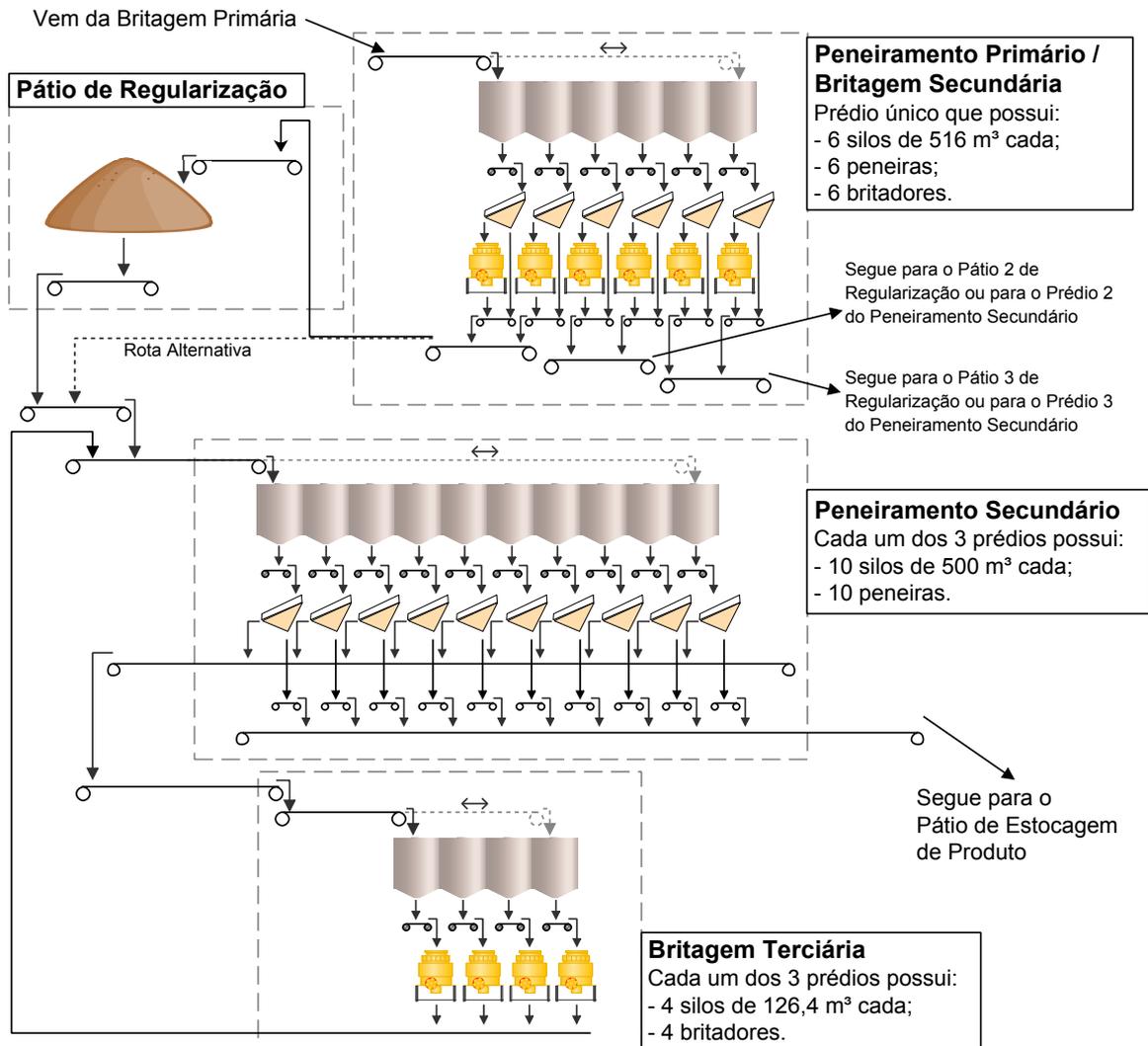


Figura 2.12: Fluxograma simplificado de S11D.

Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

Algumas das características dos algoritmos de controle e acionamento dos equipamentos de cada área são apresentadas nas subseções seguintes. É dado destaque apenas àquelas que precisam ser levadas em consideração na simulação por terem influência significativa nos processos que são foco desse trabalho.

2.2.1. Peneiramento primário/Britagem secundária

Como já dito sobre a área de peneiramento primário/britagem secundária, o material é distribuído nos silos por um sistema de correia transportadora com translação de cabeça móvel que, para isso, utiliza estratégia de controle da forma mostrada na Figura 2.13. A cabeça móvel se desloca continuamente sobre os silos com velocidade de translação variável, sendo ela definida por um algoritmo que calcula um valor específico para cada silo. Dentre outros parâmetros, o algoritmo de definição da velocidade leva em consideração a média do nível médio individual dos silos que estão em operação, com o objetivo de distribuir o material entre eles e buscando um formato em “V”, em que os silos centrais operam com nível médio menor que os silos da ponta — tal abordagem é utilizada devido à distância percorrida pelo cabeça móvel sobre os silos das pontas ser menor que nos centrais. No algoritmo, é calculado o nível esperado de cada silo que, mantendo o nível médio atual dos silos ativos, permita atingir a angulação desejada para o formato em “V” da distribuição. Esse nível esperado é utilizado como a referência de um controlador de nível do tipo Proporcional-Integral (PI) que tem como saída um fator que é multiplicado pela velocidade máxima permitida para a translação. O resultante dessa multiplicação é a velocidade a ser utilizada para a translação do cabeça móvel sobre o silo, com exceção dos silos que estejam fora de serviço ou já estejam com o nível muito alto, pois nesse caso o cabeça móvel translada com velocidade máxima.

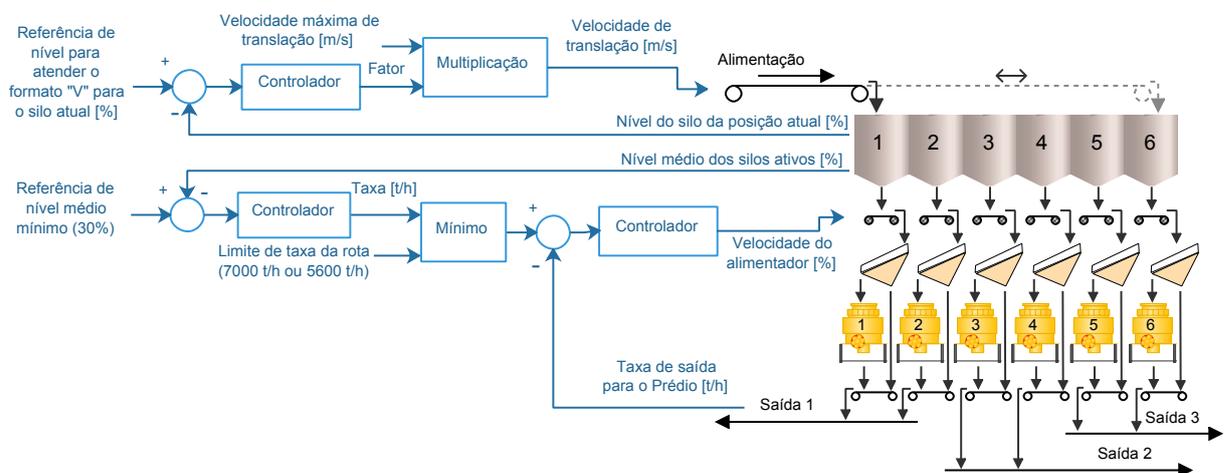


Figura 2.13: Controles existentes na área de Peneiramento Primário/Britagem Secundária.

Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

Com relação à lógica que define a velocidade dos alimentadores das peneiras, esse valor é definido por controladores PI que buscam manter a taxa de cada uma das três correias transportadoras de saída próxima à referência calculada para elas. Existem controladores separados para cada dupla de alimentadores que levam a prédios diferentes, sendo que ambos alimentadores dessa dupla trabalham sempre com a mesma velocidade. A referência de cada um desses controladores é o menor valor entre a taxa necessária para manter o nível médio mínimo de 30% e a taxa associada à rota que o material percorre naquele prédio. Caso o material siga para

o empilhamento no pátio de regularização, a taxa considerada é de 7000 t/h por correia. Caso ele siga a rota alternativa e vá direto para o peneiramento secundário, é considerada taxa de 5600 t/h por correia.

2.2.2. Peneiramento Secundário

O método utilizado pela usina para controle da velocidade dos alimentadores do peneiramento secundário, como mostrado na Figura 2.14, é baseado em regras. Essas regras foram criadas para manter a taxa das correias do *underflow* e do *overflow* das peneiras dentro de limites considerados adequados para permitir um melhor aproveitamento da capacidade das correias. Visto que o material que chega ao peneiramento secundário sofre variação de sua granulometria devido a alterações da alimentação nova ou da carga circulante, a classificação pode levar alguma das correias citadas a atingir seu limite de capacidade em diferentes momentos. Nessa situação, pode ser necessário corrigir a velocidade dos alimentadores para reduzir a taxa e a manter na faixa adequada de trabalho, sendo que aquela correia que necessitar de uma maior redução é a que prevalece no controle. Uma característica da planta é a existência de um tempo considerável para que uma alteração de velocidade no alimentador cause uma alteração na taxa medida pelas balanças. Essas balanças estão instaladas nas correias transportadoras e medem o fluxo de material transportado, indicando a vazão mássica instantânea em t/h. Devido ao comprimento das correias e considerando sua operação com velocidades nominais, esse tempo é de aproximadamente 100 s para a balança do *underflow* e 140 s para a balança do *overflow*.

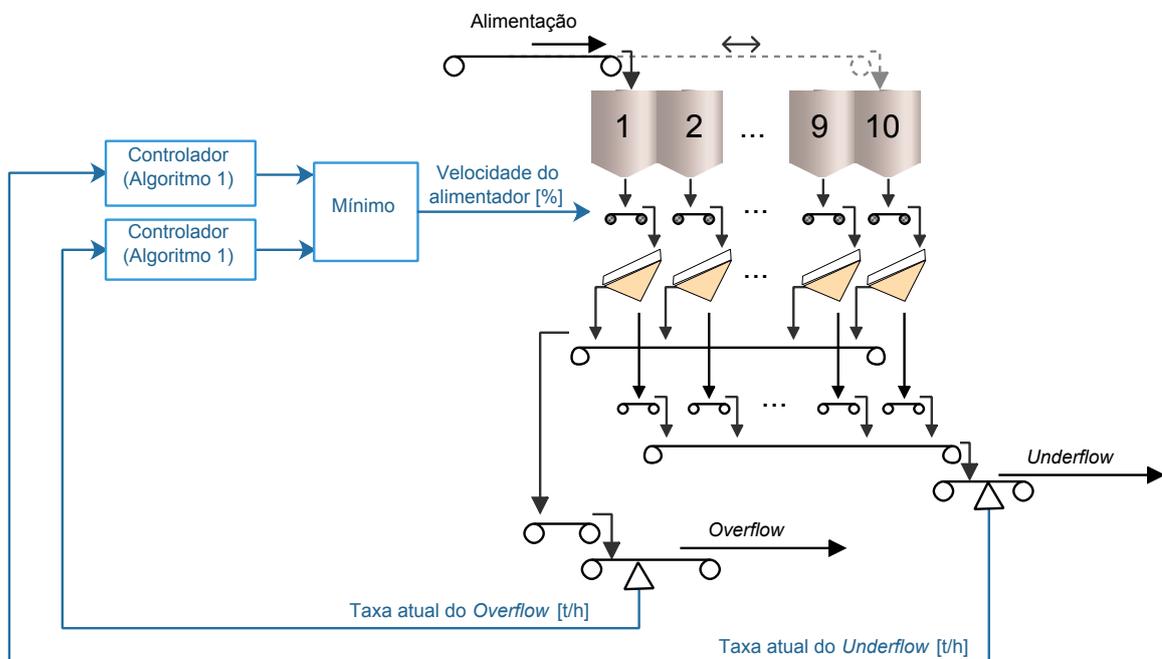


Figura 2.14: Controles existentes na área de Peneiramento Secundário.
Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

O Algoritmo 1 apresenta o sistema utilizado na usina. Os limites da faixa de trabalho são

definidos baseando-se na capacidade máxima das correias e são chamados de Limite Superior de Controle (LSC) e Limite Inferior de Controle (LIC). Quando a taxa atual de qualquer uma das correias está fora de sua respectiva faixa de trabalho, um novo fator de correção da velocidade dos alimentadores é calculado pela divisão entre o limite mais próximo da taxa atual e a própria taxa atual. Para evitar que as correções levem a uma alteração brusca de velocidade, esses fatores são restringidos por um Limite Máximo de Fator (LMaxF) e um Limite Mínimo de Fator (LMinF). Após um cálculo de fator, um pulso de correção com duração de dois segundos é habilitado. Com isso, a referência de velocidade é corrigida apenas na borda de subida desse pulso. A correção do controlador é então bloqueada para aquela correia e um novo cálculo de fator só ocorre após passado um Tempo de Espera de Correção (TEC). Os valores de TEC são maiores que o tempo necessário para que o material saia do silo e chegue às balanças, evitando chaveamentos frequentes e que várias alterações na velocidade sejam realizadas antes que seus efeitos sejam sentidos nas medições de taxa. Os fatores retornados pelo Algoritmo 1 são multiplicados pela velocidade atual do alimentador, de forma a encontrar as velocidades necessárias para que cada uma das correias retorne para sua faixa de trabalho. No instante em que há um pulso de correção habilitado, a referência de velocidade é atualizada como sendo a menor entre essas velocidades necessárias (limitada entre 30% e 100% da velocidade nominal do equipamento), garantindo que prevaleça a correia que precise de maior redução da velocidade do alimentador. A Tabela 2.1 traz os parâmetros considerados para as regras do sistema em cada uma das correias, sendo esses parâmetros definidos pela equipe de S11D para atender às faixas de trabalho desejadas para as taxas e velocidade dos alimentadores.

Tabela 2.1: Parâmetros para o controle baseado em regras.

Parâmetro	<i>Underflow</i>	<i>Overflow</i>
LSC [t/h]	5600	2600
LIC [t/h]	4500	2100
LMaxF	1,05	1,3
LMinF	0,3	0,3
TEC [s]	130	360

Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

2.2.3. Britagem Terciária

Na área de britagem terciária de S11D, o material também é distribuído nos silos por um sistema de correia transportadora com translação de cabeça móvel. As lógicas de controle existentes são apresentadas na Figura 2.15 e detalhes sobre algumas delas são estudadas com detalhes em Albuquerque *et al.* (2019). Nesse sistema, o número de silos necessários para uma distribuição de material eficiente é calculado pelo Algoritmo 2 utilizando o nível médio dos silos ativos. São considerados silos ativos aqueles que não foram retirados de operação pelo

Algoritmo 1 Cálculo de fator de correção

Entrada: taxa atual, LSC, LIC, LMaxF, LMinF, TEC

Saída: novo fator, pulso de correção

Inicialização :

- 1: controlador liberado;
- 2: novo fator \leftarrow 1;
- 3: correção não iniciada;
- 4: pulso de correção desabilitado;

Laço de Repetição :

- 5: **enquanto** planta em operação **faça**
 - 6: **se** o controlador está liberado **então**
 - 7: **se** taxa atual > LSC **então**
 - 8: novo fator \leftarrow LSC / taxa atual;
 - 9: iniciar correção;
 - 10: **senão se** taxa atual < LIC **então**
 - 11: novo fator \leftarrow LIC / taxa atual;
 - 12: iniciar correção;
 - 13: **fim se**
 - 14: **se** novo fator > LMaxF **então**
 - 15: novo fator \leftarrow LMaxF;
 - 16: **senão se** novo fator < LMinF **então**
 - 17: novo fator \leftarrow LMinF;
 - 18: **fim se**
 - 19: **se** a correção foi iniciada **então**
 - 20: habilitar pulso de correção;
 - 21: bloquear controlador;
 - 22: iniciar contagem de tempo;
 - 23: **fim se**
 - 24: **senão**
 - 25: **se** a correção foi iniciada **então**
 - 26: **se** tempo decorrido > 2 segundos **então**
 - 27: desabilitar pulso de correção;
 - 28: **fim se**
 - 29: **se** tempo decorrido > TEC **então**
 - 30: finalizar correção;
 - 31: liberar controlador;
 - 32: **fim se**
 - 33: **fim se**
 - 34: **retorna** novo fator;
 - 35: **retorna** pulso de correção;
 - 36: **fim se**
 - 37: **fim enquanto**
-

operador, não foram retirados por excederem o número necessários de silos ou, ainda, os que não excederam seus limites máximos de nível. No cálculo, um nível médio dos silos ativos menor que 40% do nível máximo reduz na contagem de silos necessários e desativa o último silo da sequência que esteja ativado. Um nível médio dos silos ativos maior que 60% do nível máximo acrescenta na contagem de silos necessários e ativa o primeiro silo da sequência que esteja desativado. O número de silos necessários deve estar entre 1 e 6, sendo essa a quantidade de silos por prédio da britagem terciária. Uma nova alteração no número de silos necessários só é permitida depois de passados pelo menos 60 segundos após a última alteração.

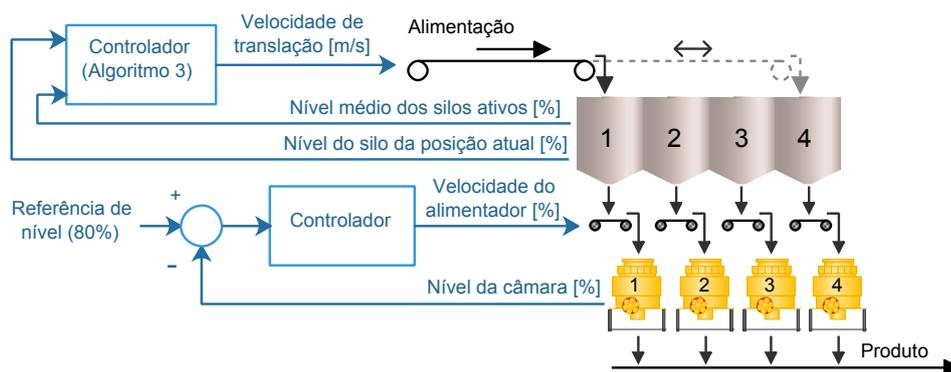


Figura 2.15: Controles existentes na área de Britagem Terciária.
Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

Algoritmo 2 Cálculo para o número de silos necessários

Entrada: nível médio dos silos ativos

Saída: número de silos necessários

Inicialização :

1: iniciar contagem de tempo;

Laço de Repetição :

2: **enquanto** planta em operação **faça**

3: **se** tempo decorrido ≥ 60 segundos **então**

4: ler nível médio dos silos ativos;

5: **se** nível médio dos silos ativos $\geq 60\%$ e número de silos necessários < 6 **então**

6: número de silos necessários \leftarrow número de silos necessários + 1;

7: zerar e reiniciar contagem de tempo;

8: **senão se** nível médio dos silos ativos $\leq 40\%$ e número de silos necessários > 1 **então**

9: número de silos necessários \leftarrow número de silos necessários - 1;

10: zerar e reiniciar contagem de tempo;

11: **fim se**

12: **retorna** número de silos necessários;

13: **fim se**

14: **fim enquanto**

A velocidade da translação do sistema é definida de acordo com a posição (número do silo) sobre a qual o cabeça móvel se encontra e está associada a um fator pré-definido para

aquele silo e à diferença entre o nível médio dos silos ativos e o nível do silo atual. O Algoritmo 3 apresenta o cálculo realizado e mostra que, caso o silo atual não esteja ativo ou seu nível seja maior que o nível médio dos silos ativos, o cabeça móvel translada sobre ele com velocidade máxima.

A velocidade dos alimentadores é definida por um controlador PI de forma a manter o nível da câmara de cada britador em 80%. A saída desse controlador é limitada entre 30% e 100%.

Algoritmo 3 Cálculo da velocidade de translação do cabeça móvel

Entrada: nível médio dos silos ativos, posição atual, nível do silo da posição atual, estado do silo atual, velocidade máxima, fator para o silo da posição atual

Saída: velocidade de translação do cabeça móvel

Inicialização :

1: ler velocidade máxima;

Laço de Repetição:

2: **enquanto** planta em operação **faça**

3: ler nível médio dos silos ativos;

4: ler posição atual;

5: ler estado do silo atual;

6: ler nível do silo da posição atual;

7: **se** estado do silo atual \neq ativo **ou** nível do silo da posição atual $>$ nível médio dos silos ativos **então**

8: velocidade de translação do cabeça móvel \leftarrow velocidade máxima;

9: **senão**

10: velocidade de translação do cabeça móvel \leftarrow velocidade máxima $-$ fator para o silo da posição atual \times (nível médio dos silos ativos $-$ nível do silo da posição atual);

11: **fim se**

12: **retorna** velocidade de translação do cabeça móvel;

13: **fim enquanto**

3. Simulações dinâmicas para auxílio na tomada de decisão de alterações físicas e de controle do processo

Nesse capítulo são apresentadas simulações dinâmicas para auxílio na tomada de decisão de alterações físicas e controle do processo. As seções são divididas de forma a apresentar o contexto, seguido da formulação do problema, revisão bibliográfica e metodologia. As seções seguintes são específicas para cada estudo de caso realizado: o Estudo de Caso 01 (EC01) traz o problema da alocação de britadores da britagem terciária (resultados já publicados em Duarte *et al.* (2019)), no Estudo de Caso 02 (EC02) é tratado o problema da alteração da velocidade máxima de translação do sistema de correia com cabeça móvel da britagem secundária/peneiramento primário (resultados já publicados em Duarte *et al.* (2020a)) e, por fim, o Estudo de Caso 03 (EC03) apresenta o problema da substituição da estratégia de controle da velocidade dos alimentadores do peneiramento secundário (resultados já publicados em Duarte *et al.* (2020b)). As definições de cenários e parâmetros utilizados, além dos resultados e discussões, são apresentados como subseções de cada uma dessas seções específicas.

3.1. Contexto

Todo processo operacional deve operar em condições que garantam que restrições relacionadas ao ambiente e à segurança não sejam violadas e que o desperdício de matérias-primas e a produção de subprodutos indesejados seja mínima, permitindo a busca pela maximização do lucro. Uma vez que a planta já está operacional, uma série de eventos inesperados podem resultar na necessidade de fazer alterações no fluxograma original do processo. Além disso, mesmo com manutenção adequada, alguns equipamentos podem perder sua capacidade de produção original com o passar do tempo. Ainda que os equipamentos estejam atendendo suas capacidades nominais, pode-se decidir que os níveis de produção atuais devem ser aumentados e, para isso, o fluxograma do processo deve ser modificado para incorporar novos equipamentos. Tais situações podem alterar os objetivos e as escolhas dos equipamentos disponíveis, a fim de atender às condições ótimas de operação mencionadas e, por isso, é necessário investigar de alguma forma os efeitos do novo equipamento e de outras alterações necessárias. Obviamente, é possível investigar o desempenho de diferentes arranjos fazendo as alterações diretamente na planta. Porém, na prática industrial, essa solução não é bem-vinda, pois pode afetar a produção, gerar custos desnecessários, criar situações que comprometam a segurança, entre outros problemas.

Simulador dinâmico é um software que pode recriar de forma confiável o fluxograma da planta e, em um ambiente computacional, permite ao usuário realizar experimentos de teste sem nenhum risco ou custo adicional (LU *et al.*, 2014). O projeto e simulação de processos auxiliados por computador permitem a investigação de vários cenários, alguns dos quais podem ser impraticáveis em ambientes reais, em um tempo relativamente curto (STANGE, 1991).

Combinando a eficiência de modelos técnicos dinâmicos com uma análise de custo, os engenheiros da planta podem fazer suposições fundamentadas quanto à aquisição e substituição de equipamentos.

Este capítulo relata estudos de caso reais da mina de S11D em que a simulação dinâmica foi utilizada para auxílio na tomada de decisão com relação a substituição de equipamentos por outros com características diferentes, alterações de parâmetros utilizados e troca de estratégias de controle. Todas essas tomadas de decisão, se realizadas incorretamente, podem levar à redução na produtividade da planta devido à redução na eficiência da distribuição de material que entra ou que sai dos silos ou à impossibilidade da utilização da capacidade nominal dos equipamentos, como apresentado na seção seguinte, em que é feita a formulação do problema.

3.2. Formulação do Problema

A distribuição de material nos silos é feita por um sistema de correia com translação de cabeça móvel em S11D. Considerando inicialmente que todos os silos estejam ativos, isto é, que nenhum deles tenha atingido o nível alto que o bloqueia e que nenhum deles foi desabilitado pelo operador, o sistema de cabeça móvel desloca percorrendo do primeiro ao último silo, retornando novamente ao primeiro, como já havia sido representado na Figura 2.3. Caso a velocidade de translação seja fixa, haverá diferença no tempo que o sistema fica sobre cada um dos silos, pois o percurso não inclui todo o comprimento dos silos das pontas, como mostrado na Figura 3.1, que apresenta as dimensões de percurso para os silos da britagem terciária de S11D. Além disso, como ressaltado por Albuquerque *et al.* (2019), quanto mais periférico o silo, maior é o intervalo de tempo entre os instantes de alimentação. Os autores exemplificam essa diferença mostrando a sequência de alimentação iniciando pelo Silo 1 (Figura 3.2a) e iniciando pelo Silo 2 (Figura 3.2b). É visível que, para um mesmo número de transições, o Silo 2 é alimentado três vezes, enquanto o Silo 1 é alimentado apenas duas vezes.

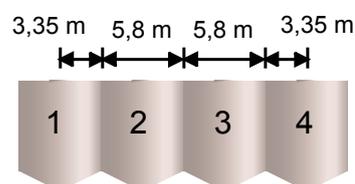


Figura 3.1: Exemplo de dimensões do percurso do sistema de distribuição sobre cada silo.

Fonte: O autor.

Caso não haja uma correta compensação na velocidade de translação para cada um dos silos, uma situação semelhante a da Figura 3.3 pode ocorrer. Devido à má distribuição, um dos silos, o segundo do exemplo, atinge o seu nível de bloqueio, fazendo com que o sistema de distribuição saia imediatamente de cima dele. A lógica então faz o movimento de translação para o lado em que há o maior número de silos desbloqueados em sequência. No exemplo,

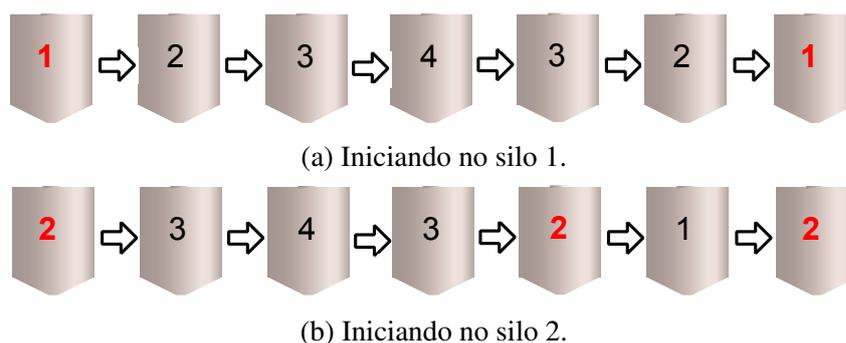


Figura 3.2: Ciclo de alimentação dos silos.
Fonte: Adaptado de Albuquerque *et al.* (2019).

a distribuição se limitaria, portanto, aos Silos 3 e 4, enquanto o Silo 2 não atinge seu nível de retorno. Além disso, o Silo 1, mesmo estando com o nível próximo do mínimo, deixa de receber alimentação, podendo acionar o intertravamento e desligar o alimentador que está associado a ele até que se atinja o nível de retorno. Esse desligamento temporário certamente traz redução de produtividade, porém, também está associado a problemas de manutenção do equipamento que está sendo alimentado. Em caso de britadores cônicos, por exemplo, com o desligamento do alimentador, a câmara do equipamento se esvazia e, com o religamento da alimentação, passa a receber material diretamente sobre seu revestimento, causando desgastes que podem trazer a necessidade de ajustes na abertura ou da troca do revestimento. Além disso, é recomendável trabalhar com câmara cheia por questões de eficiência de britagem, pois quanto mais alto o nível na câmara e a taxa de alimentação, menores são as dimensões do produto e mais alta é a taxa de produção (ITÄVUO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2020).

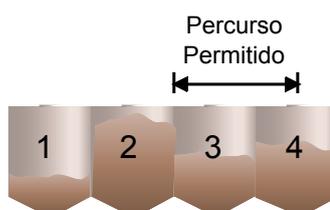


Figura 3.3: Exemplo de situação em que um dos silos é bloqueado por nível alto.
Fonte: O autor.

Outro detalhe importante citado por Albuquerque *et al.* (2019) é a geometria dos silos. Normalmente, os silos de uma mesma área apresentam a mesma geometria, porém, dependendo da área e da usina, podem ter o formato de um paralelepípedo ou de algum sólido geométrico irregular. Há casos em que a área da base é menor que a do topo, com o volume sendo uma função não linear do nível. Dessa forma, quanto menor a altura de material nos silos, mais rápido o nível varia para a saída ou entrada de um mesmo volume de material e, portanto, maior é a variabilidade.

A variabilidade do nível dos silos também está associada à velocidade dos alimentadores que retiram material deles. Normalmente, a velocidade é definida de acordo com as limitações

dos equipamentos na sequência do fluxo de processo, por exemplo, limitações referentes à capacidade máxima de correias e alimentadores, nível máximo da câmara dos britadores, capacidade de produção e potência nominal dos britadores, peneiras e demais equipamentos. Além disso, a estratégia de definição da velocidade dos alimentadores também pode incluir um controlador para manter um nível mínimo nos silos dos quais eles retiram material ou manter uma determinada taxa nas correias à jusante.

De acordo com o levantamento feito em Olivier e Craig (2017), grande parte das malhas de controle operando na mineração são do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), mas com crescente uso de controle avançado, especialmente Controle Preditivo Baseado em Modelo (*Model Predictive Control*, MPC) (CHEN *et al.*, 2007; MOREIRA & EUZÉBIO, 2018; REIS *et al.*, 2018) e controle especialista baseado em regras (ALBUQUERQUE *et al.*, 2019; VAN DRUNICK *et al.*, 2005). Ainda de acordo com o estudo em Olivier e Craig (2017), mais da metade desses controladores avançados estão aplicados na camada de controle regulatório, ou seja, fora dos objetivos usuais para este tipo de controlador que é o de otimizar a produção e aprimorar o planejamento operacional da planta. Parte dessa inadequação de estratégias é explicada pela falsa ideia de que implantar métodos de controle mais sofisticados dá, obrigatoriamente, resultados superiores aos de um simples Proporcional-Integral (PI). Pode-se incluir também que, em geral, a formação de um engenheiro de minas no Brasil não possui disciplinas de controle de processos, o que torna mais fácil explicar o funcionamento de uma sequência lógica de IF/ELSE do que a sintonia de um controlador PID. Dessa forma, caso a estratégia de controle seja escolhida apenas por ser mais sofisticada ou, até mesmo, por ser mais simples de entender, pode resultar em consequências negativas para o processo. Uma estratégia definida de forma incorreta pode elevar a variabilidade do nível, trazer instabilidade para o sistema ou levar à não utilização da capacidade nominal de equipamentos, o que significa perda de produtividade.

3.3. Revisão bibliográfica

Dois usos importantes da modelagem e simulação dinâmica no setor industrial são: obter uma estimativa antecipada dos efeitos de alguns fenômenos, em tempo menor do que se fosse necessário aguardar tal fenômeno ocorrer, para auxiliar em algum tipo de tomada de decisão; e investigar cenários que poderiam representar perigo para os equipamentos ou pessoas ou cenários que poderiam afetar a produção da planta (LU *et al.*, 2014), resultando em perda de recursos (KARELOVIC *et al.*, 2016).

Na indústria mineral, a aplicação da modelagem e simulação dinâmica já é estudada há alguns anos e sua evolução vem sendo apresentada em diversos trabalhos. Na década de 80, Lynch e Narayanan (1986) definiram a simulação como uma ferramenta de projeto para o futuro e demonstraram o projeto de um circuito de cominuição utilizando a simulação para definição da quantidade de equipamentos e suas condições de operação. Porém, os autores também mostra-

ram que, na época de seus estudos, modelos não eram amplamente utilizados para propósitos de projetos na indústria mineral devido às dúvidas que existiam sobre a precisão das representações e sobre a utilização de técnicas que ainda não eram familiares aos engenheiros. Anos mais tarde, já utilizando um software de simulação, King (1990) realizou um estudo de caso em um circuito de britagem para demonstrar a simulação como uma forma moderna e economicamente viável de resolver problemas desse tipo de processo. O autor simulou alterações na abertura das peneiras e dos britadores do circuito quaternário, com o objetivo de identificar formas de tornar essa etapa mais eficiente. Ainda na década de 90, Napier-Munn e Lynch (1992) já consideravam a simulação como uma técnica bem estabelecida para projeto e otimização na indústria mineral, apresentando modelos existentes para equipamentos e ressaltando que, naquele momento, havia ainda a necessidade de desenvolver modelos para algumas das atividades desse setor, como a liberação mineral, a flotação e outros processos de concentração. Em estudo dos anos 2000, uma nova visão geral da simulação na indústria mineral é feita por Herbst *et al.* (2002), que cita a Simulação de Alta Fidelidade (*High Fidelity Simulation*, HFS), conceito esse que inclui o Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method*, DEM), Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), Quebra Discreta de Grãos (*Discrete Grain Breakage*, DGB) e Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method*, FEM), técnicas que se tornaram possíveis graças aos avanços computacionais. Por fim, mais recentemente, o estudo de Cisternas *et al.* (2020) traz as tendências na modelagem, projeto e otimização de sistemas multifásicos em processamento mineral e fala sobre as novas estratégias utilizando inteligência artificial e o uso combinado de CFD com DEM e de Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology*, RSM) com Rede Neural Artificial (*Artificial Neural Network*, ANN).

Existem diversos tipos de software de simulação dinâmica disponíveis comercialmente, sendo alguns deles específicos para um certo tipo de indústria e outros mais genéricos (YOUNG, 2019). Alguns exemplos são o IDEAS[®] (Andritz Automation), o HYSYS[®] (AspenTech) e o Mimic[®] (Emerson). Existem trabalhos apresentados na literatura baseados em software comercial de simulação dinâmica, por exemplo, trabalhos relacionados à avaliação de estratégias de controle antes da implementação na planta (como visto em Magalhães e Euzébio (2018) e Albuquerque *et al.* (2019)) e relacionados à validação de modelo para avaliação de estratégias de controle como uma ferramenta de treinamento utilizando o IDEAS[®] (como visto em Suvarna *et al.* (2019)). Por outro lado, grupos de pesquisa acadêmica podem desenvolver e implementar seus próprios modelos de processo em plataformas de simulação dinâmica, como o MATLAB[®]/Simulink[®] (Mathworks) ou Dymola[®] (Dessault Systèmes) (ZUPANČIČ & SODJA, 2013), ou criar seus próprios pacotes de simulação, como o modelo da planta de moinho de bolas em Lu *et al.* (2014).

As decisões iniciais dos investidores de seguir ou cancelar um projeto de mineração, baseadas em diretrizes de desenvolvimento sustentáveis, são potencialmente auxiliadas pela modelagem (KAMENOPOULOS *et al.*, 2018). Por exemplo, abordagens baseadas em simulação

para gerenciamento de risco podem ajudar a encontrar a localização mais adequada para a instalação de um projeto de mineração (PARICHEH & OSANLOO, 2018). O objetivo do projeto da planta é obter especificações que maximizem o retorno e, ao mesmo tempo, respeite todos os critérios técnicos e econômicos (KHALESI *et al.*, 2015). Modelos dinâmicos precisos de equipamentos, reunidos em um ambiente de simulação e em conjunto com modelos econômicos, são amplamente usados na indústria, tanto para o projeto inicial da planta quanto para quando a planta já em uso e alguns parâmetros operacionais são alterados.

Existe um grande número de fatores que influenciam nas operações da mineração e os trabalhos de modelagem e simulação presentes na literatura tentam equilibrar esses fatores para fornecer resultados realistas sem incorrer em um modelo inviável ou, desnecessariamente, complexo e grande. A recuperação de ouro das polpas de lixiviação de cianeto pelo método de carbono em polpa, por exemplo, é um processo complexo que compreende etapas de adsorção, eluição e precipitação. A interação entre as variáveis de cada estágio torna esse processo difícil de otimizar. Stange (1991) propôs o projeto de uma planta de carbono em polpa baseado na otimização econômica do processo. Modelos matemáticos dinâmicos para a adsorção e eluição, combinados com um modelo econômico considerando custos de capital e operacionais, possibilitaram comparar o balanço financeiro projetado para diferentes números de estágios de adsorção e permitiram identificar qual é o número ótimo desses estágios.

A viabilidade e lucratividade dos sistemas de mineração de superfície são altamente dependentes dos custos de transporte. Dessa forma, a localização dos pontos de distribuição das correias transportadoras está normalmente associado a esses custos. Roumpos *et al.* (2014) calcularam as coordenadas do ponto de distribuição ótimo baseado em um modelo que considera fatores geológicos, geométricos e econômicos da mina. Além disso, os autores usam o modelo desenvolvido para examinar os diferentes cenários de um depósito de lignito. No trabalho deles, os autores investigaram um modelo estático mais simples, gerando resultados iniciais nos quais os autores puderam incorporar características dinâmicas como sazonalidade, taxas de produção variáveis e critérios econômicos. Um modelo estático para o projeto de planta na indústria de processamento mineral, em conjunto com modelos de custo para equipamentos e infraestrutura baseado em regressão de dados empíricos, foi desenvolvido em Khalesi *et al.* (2015). Bernardi *et al.* (2020) desenvolveram uma ferramenta de avaliação de custos baseada em simulação de eventos discretos e funções de custo para investigar se a substituição de caminhões pelo sistema com britadores dentro da cava e correias transportando o material para a usina traria algum benefício financeiro.

Alguns trabalhos da literatura não usam explicitamente um modelo econômico, mas realizam a otimização do fluxograma do projeto com base em alguns critérios implícitos, como o rendimento do processo. Que *et al.* (2016) desenvolveram um modelo estocástico para o sistema de transporte contínuo com dutos articulados no solo, que também é aplicável para britadores e sistemas de correias transportadoras. As simulações permitiram uma melhor compreensão de como os parâmetros operacionais afetam as principais variáveis econômicas, como produção

do sistema, tempo de espera e utilização. Além disso, com base no conhecimento adquirido, as simulações também possibilitaram sugerir valores ideais para os parâmetros operacionais de um sistema específico. Em Ozdemir e Kumral (2019), um modelo estocástico foi usado para otimizar o manuseio de material de escavadeiras em minas a céu aberto, relatando um aumento de 9,4% na produção.

Nos últimos anos, o termo “gêmeos digitais” (*Digital Twins*) tem sido utilizado para representações virtuais que também podem realizar troca de dados entre os equipamentos reais. O conceito do uso de “gêmeos” já havia sido utilizado na época do programa espacial Apollo da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a agência espacial americana. Dois veículos espaciais idênticos foram construídos e um deles, que se manteve na Terra, foi utilizado de forma intensa em treinamentos durante as preparações de voo, espelhando as condições do espaço para permitir simulações de alternativas para os astronautas durante condições críticas (BOSCHERT & ROSEN, 2016). Com o passar dos anos, foi possível modelar e simular virtualmente os equipamentos e processos com maior precisão. Apesar disso, somente em 2010 o termo “gêmeos digitais” foi utilizado pela primeira vez em uma publicação da NASA (SHAFTO *et al.*, 2010). A abrangência do termo ainda não é um senso comum, mas Kritzinger *et al.* (2018) apresentam três subcategorias baseadas no nível de integração de dados: *Digital Model*, em que não ocorre troca de dados em tempo real entre o modelo físico e seu gêmeo digital; *Digital Shadow*, em que apenas há envio de informações em tempo real do modelo físico para o virtual; e *Digital Twin*, em que há troca de dados em tempo real nos dois sentidos. Atualmente, a utilização de *digital twins* é bastante incentivada para simular decisões e otimizações e eles podem ser encontrados em empresas como General Electric, Chevron e Siemens (TAO & QI, 2019).

Os *digital twins* também estão presentes na indústria mineral e *digital models* aparecem em trabalhos aplicados aos circuitos de cominuição, seja para treinamento, otimização ou controle de processos. Asbjörnsson *et al.* (2013) modelaram uma planta de britagem para utilização em treinamento de operadores. O simulador permite criar situações realísticas para os colaboradores da sala de controle, trazendo conhecimento e experiência pela exposição a diversos cenários virtuais enquanto a própria planta real ainda está sendo construída.

Santos *et al.* (2020) utilizaram a simulação para aplicar um algoritmo baseado em *simheuristic* buscando um método de operação eficiente de um circuito de britagem. Os autores criaram um sistema de suporte à decisão para otimizar a quantidade de equipamentos que devem operar no circuito, resultando em aumento de produção. Já no estudo de Neves e Tavares (2004), o objetivo é racionalizar o uso de energia em um circuito de britagem. Com o auxílio da simulação computacional, os autores concluíram que um aumento na abertura dos britadores terciários e quartenários permitiria uma redução do consumo energético global, além de levar a um aumento na proporção de material produzido. Além disso, baseando-se nas simulações, concluíram que outra forma de reduzir o consumo energético seria pelo uso de revestimentos novos nos britadores, sem qualquer alteração na partição dos produtos da usina. Campos *et al.* (2019b) utilizaram

a simulação como auxílio na tomada de decisão em um circuito com Britadores de Rolos de Alta Pressão (*High Pressure Grinding Rolls*, HPGRs), buscando otimizar a operação desses equipamentos. Foram simulados cenários para duas opções de pressão de operação, onde também se variou a área superficial específica da alimentação. Outra situação simulada pelos autores buscava comparar o desempenho dos HPGRs quando o circuito de moagem que envia material para esses equipamentos era do tipo circuito fechado ou do tipo circuito aberto, isto é, com ou sem a presença de um equipamento de classificação que retorna parte do material para a moagem.

Johansson e Evertsson (2018) aplicaram MPC em um circuito com HPGRs e peneiras. A simulação auxiliou os autores a projetarem o controlador de forma a manter certo nível de material nos silos de alimentação dos equipamentos, além de focar em maximizar a produtividade do circuito. Uma planta de moinho de bolas completa foi modelada por Lu *et al.* (2014) com o propósito de comissionar e implementar estratégias de controle avançadas. Os autores afirmam que o modelo é suficientemente detalhado para ajudar pesquisadores e profissionais de controle de processo a obter conhecimento qualitativo para projetos de controle, conhecimento quantitativo para análise de desempenho dinâmico, testes de planta e treinamento de operadores.

A indústria de processamento mineral possui diversos processos com dinâmica lenta e longos atrasos de transporte. Nessas circunstâncias, as simulações são capazes de fornecer não apenas uma resposta próxima ao imediato, reduzindo drasticamente o tempo de teste, mas também fornecem uma variedade de medições, algo que não é uma prática usual em condições de operação (LU *et al.*, 2014). No trabalho de Karelavic *et al.* (2015), a simulação foi utilizada no projeto de uma estratégia de controle com o objetivo de minimizar o movimento do sistema de distribuição de material, enquanto evitava que os silos chegassem em sua capacidade máxima. Em outro trabalho, Caldas e Martins (2018) utilizaram programação linear inteira mista e programação dinâmica para tratar o posicionamento do sistema de distribuição como um problema de otimização. Os autores simularam os equipamentos buscando minimizar as variações nos níveis dos silos, garantindo que essas variáveis permaneçam estáveis e atendam às restrições do processo. Albuquerque *et al.* (2019) desenvolveram um controlador baseado em regras para controlar o nível médio de material em um conjunto de silos. Além de atuar na velocidade de translação do sistema de distribuição, os autores também controlam a quantidade de silos em uso e observaram os resultados por meio das simulações realizadas.

3.4. Metodologia

Para responder as perguntas da pesquisa sobre o uso de simulações dinâmicas para auxílio na tomada de decisão de alterações físicas e de controle do processo, a metodologia utilizada é a pesquisa experimental baseada em três estudos de caso, em que são projetados modelos independentes para o Peneiramento Primário/Britagem Secundária, Peneiramento Secundário e Britagem Terciária de S11D. O software utilizado é o IDEAS[®], desenvolvido pela

empresa Andritz Automation¹. O simulador IDEAS[®] é um ambiente gráfico baseado em objetos (Figura 3.4), no qual o usuário constrói um modelo buscando objetos em várias bibliotecas, algumas delas incluindo equipamentos utilizados na mineração, e indicando a existência de conexão entre eles. Nas janelas do software, como as mostradas na Figura 3.5, características individuais dos equipamentos, como dimensões e velocidades nominais, e características do material da alimentação, como composição e Distribuição do Tamanho das Partículas (*Particle Size Distribution*, PSD), podem ser informadas, com o objetivo de que as representações apresentem comportamento semelhante aos equipamentos reais. Os modelos existentes internamente no IDEAS[®] foram desenvolvidos com base na literatura publicada, dentre elas, King (2001) e Napier-Munn *et al.* (1996) (PARTHASARATHI *et al.*, 2009), que são algumas das utilizadas no referencial teórico apresentado no Capítulo 2 dessa dissertação.

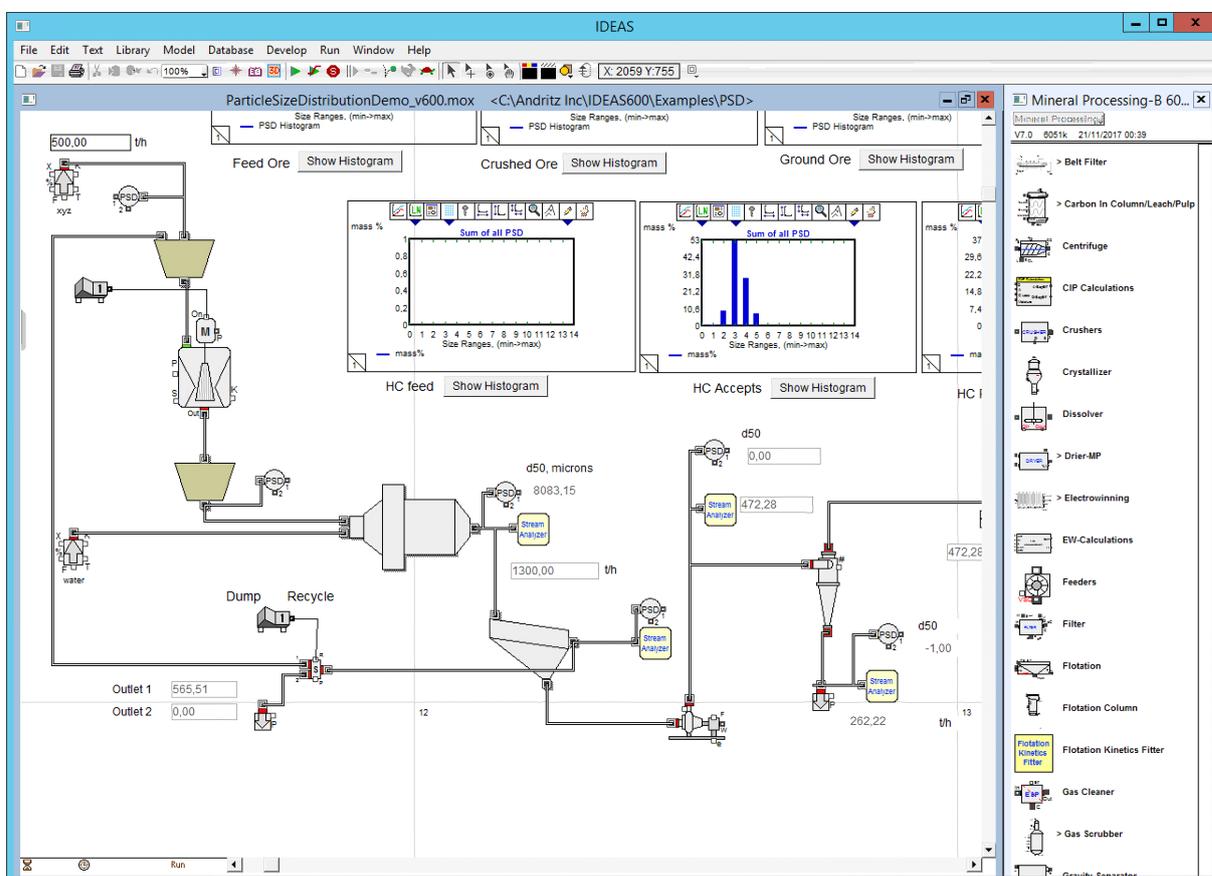


Figura 3.4: Interface do software IDEAS[®].
Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

O IDEAS[®] permite realizar troca de dados com outro software, como o MATLAB[®], via protocolo de comunicação *Object linking and embedding for Process Control* (OPC). Também via OPC, é possível realizar a troca de dados entre o IDEAS[®] e o hardware do Controlador Lógico Programável (CLP) ou Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD), técnica conhecida como *Hardware-In-the-Loop* (HIL), que consiste em incluir um hardware real no processo

¹<https://www.andritz.com/products-en/group/automation/simulation/ideas-simulation-solution>

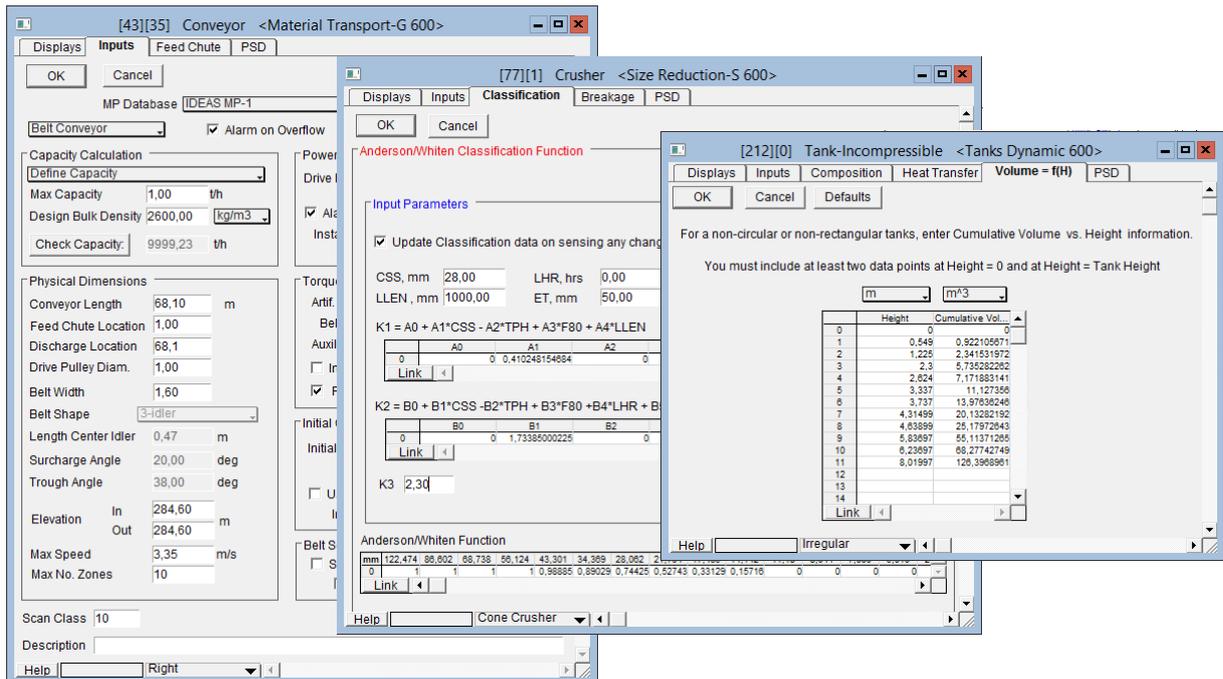


Figura 3.5: Janelas para parametrização de correias, britadores e silos no IDEAS[®].
 Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

de simulação. A técnica HIL costuma ser utilizada para garantir que o sistema de controle execute no período de amostragem correto, por rodar em tempo real. Essa garantia é importante, pois a falta do sinal de controle no fim do tempo de amostragem pode afetar a estabilidade (BACIC, 2005). Utilizar o hardware também significa que os resultados das simulações vão ser avaliados considerando as funções que realmente são aceitas por ele, pois há casos em que certas funções disponíveis em software de simulação podem não existir no hardware ou existir com alguma abordagem diferente. Além disso, realizar testes de estratégias de controle diretamente em ambientes industriais pode não ser uma atividade segura, já que alguns cenários poderiam levar o equipamento para faixas de operação que podem trazer riscos e afetar a taxa ou a qualidade da produção. O uso de HIL na indústria mineral já foi apresentado em trabalhos como Dai *et al.* (2016) e Reis *et al.* (2018). Nessa dissertação, a técnica HIL foi utilizada no EC03.

Para se obter um modelo confiável, foi necessário coletar dados dos equipamentos reais, como dimensões e capacidades dos alimentadores, correias e silos. Durante as simulações, algumas variáveis foram manipuladas e logo após foram coletados diversos dados pertinentes para cada estudo de caso, permitindo um comparação entre os cenários analisados. Informações específicas sobre cada estudo de caso são apresentadas nas seções seguintes.

3.5. Estudo de Caso 01: Alocação de Britadores

Com relação ao estudo de caso em que é analisada a alocação de novos britadores de maior capacidade, as subseções seguintes trazem a definição de cenários e os parâmetros utilizados na simulação, os resultados e as discussões sobre o que foi observado.

3.5.1. Definições de cenários e parâmetros utilizados

Considera-se inicialmente todos os quatro britadores fabricados pela Sandvick, modelo CH660, com capacidade de 500 t/h. Os cenários a serem testados incluem a troca de dois, três ou quatro desses britadores por equipamentos Sandvick do modelo CH860, com capacidade de 750 t/h. Nem todas as combinações possíveis foram testadas por decisão da equipe de S11D, que se baseou em limitações estruturais para essa escolha. A Figura 3.6a apresenta o Cenário 0 como o cenário antes da troca de qualquer britador e os demais cenários nas Figuras 3.6b a 3.6g representando as possibilidades de troca consideradas nessa pesquisa. Britadores com cor amarela representam os equipamentos de capacidade igual a 500 t/h e britadores com cor azul são aqueles com capacidade de 750 t/h.

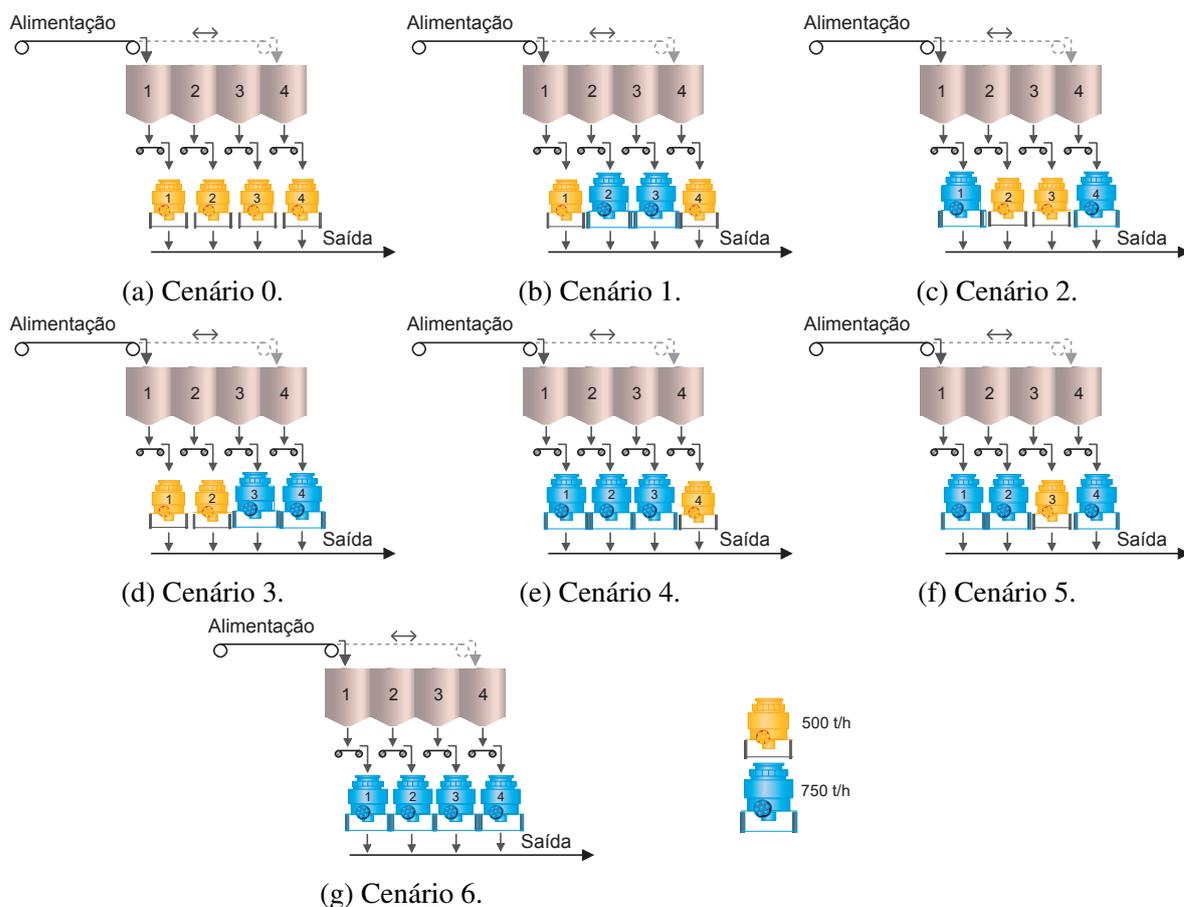


Figura 3.6: EC01 - Cenários considerados na simulação.

Fonte: O autor.

No circuito desenvolvido no software IDEAS[®] e apresentado na Figura 3.7 são utilizados os seguintes parâmetros para cada equipamento:

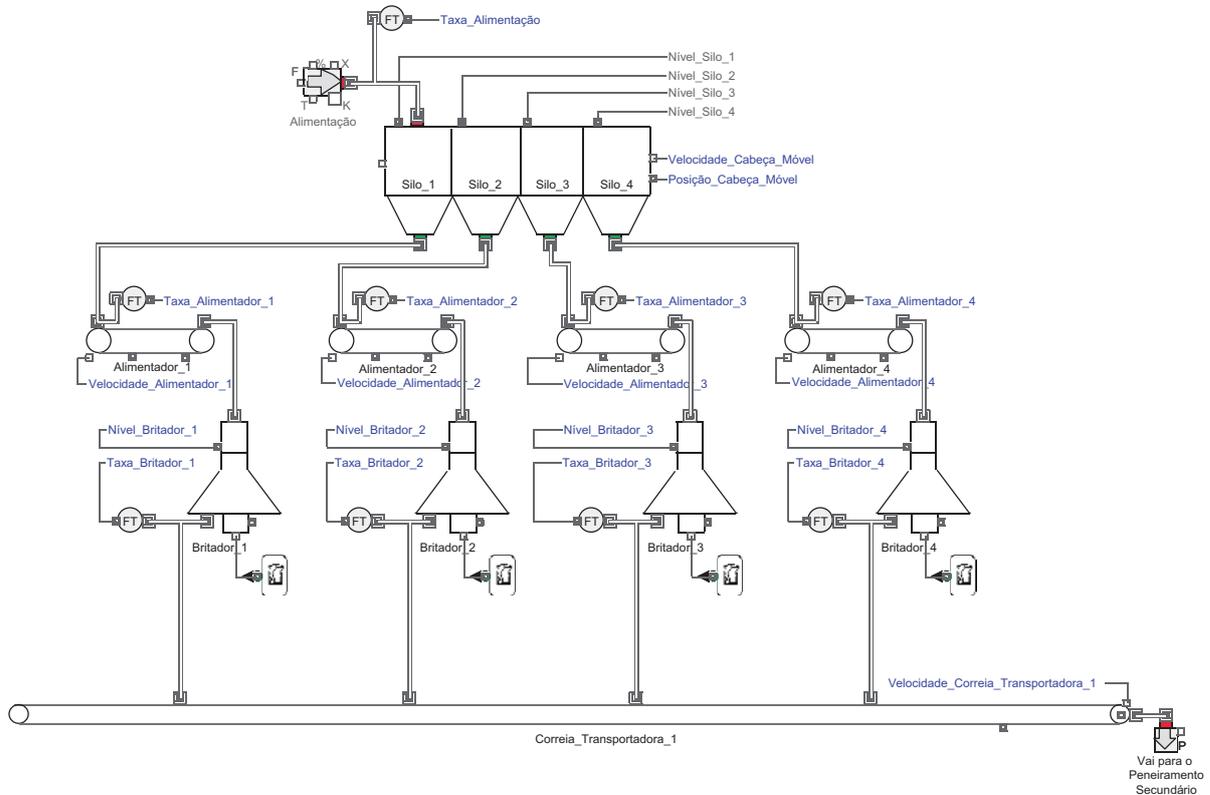


Figura 3.7: EC01 - Circuito de britagem terciária de S11D desenvolvido no software IDEAS[®].
Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

- Correia transportadora com cabeça móvel: considera-se que o cabeça móvel tenha curso total de 18,30 m e que a indicação de que ele esteja posicionado sobre determinado silo é feita da seguinte forma, em que X_{CM} indica a posição atual do cabeça móvel em metros: Silo 1: $0 \leq X_{CM} \leq 3,35$; Silo 2: $3,35 < X_{CM} \leq 9,15$; Silo 3: $9,15 < X_{CM} \leq 14,95$; Silo 4: $14,95 < X_{CM} \leq 18,30$. Os limites inferior e superior da velocidade de translação são 0,066 m/s e 0,220 m/s, respectivamente, sendo que o valor a ser utilizado é definido conforme a lógica descrita na Subseção 2.2.3 e a descarga de material ocorre em ambos sentidos de translação. Como o foco da simulação se dá a partir da distribuição do material nos silos, essa correia em si pode ser desconsiderada nesse estudo. Portanto, a simulação se inicia a partir do ponto de descarga dessa correia.
- Silos: os quatro silos da britagem terciária de S11D são do tipo tanque incompressível, sem comunicação entre si, com capacidade de 126,4 m³ cada e altura de 8,0 m. Na simulação, cada um deles é inicialmente preenchido com material em 50% do nível. Considera-se que a entrada de material ocorre ao nível da altura do silo (8,0 m), com a saída para o alimentador ao nível do fundo do silo (0,0 m). Esses silos possuem geometria irregular, sendo que a relação entre altura do silo e volume acumulado é apresentada na

Figura 3.8. Considera-se que a relação entre os eixos se mantém linear no trecho omitido do gráfico. Cada silo possui dois medidores de nível do tipo ondas acústicas em posições diferentes, sendo que o maior valor entre eles é considerado o nível do silo utilizado nas lógicas e análises.

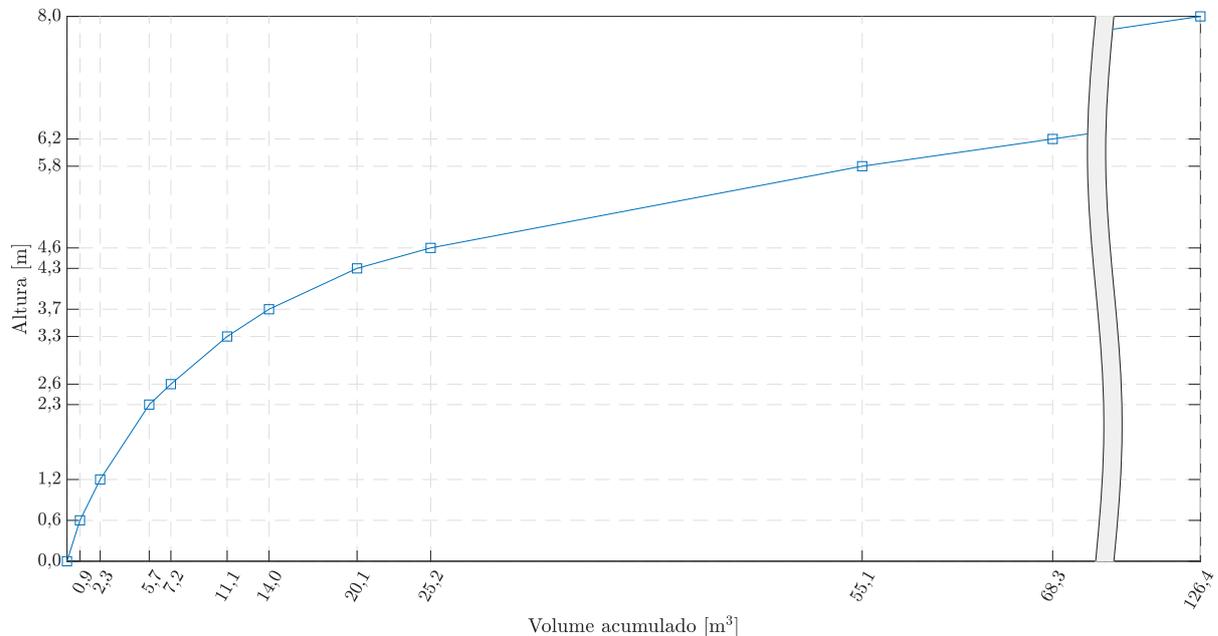


Figura 3.8: EC01 - Relação entre altura e volume acumulado dos silos.
Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

- Britadores: nessa simulação, o balanço de massa é o foco principal, não levando em consideração a granulometria do material. Por isso, a única especificação necessária para o equipamento é a sua capacidade nominal, sendo 500 t/h ou 750 t/h, conforme modelo de britador utilizado.
- Alimentadores e correias transportadoras: a correia transportadora e os alimentadores utilizados possuem as especificações apresentadas na Tabela 3.1. A velocidade dos alimentadores está associada ao controle de nível da câmara dos britadores, como descrito na Subseção 2.2.3. No caso da correia transportadora, ela trabalha em sua velocidade nominal em todo o tempo de simulação.

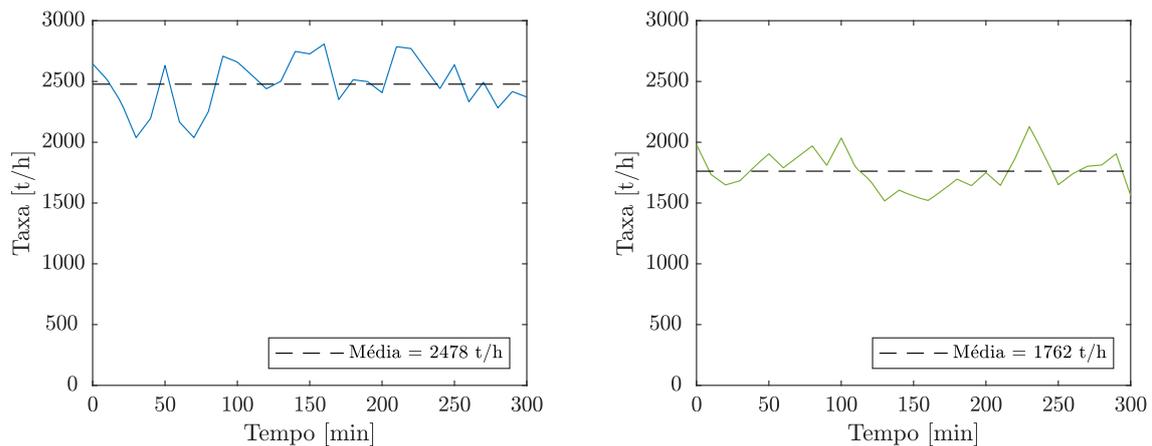
Para cada cenário, duas condições de taxas de alimentação são simuladas: uma que representa um mês em que ocorre alta taxa de recirculação de material e outra que representa baixa taxa de recirculação. Essa diferença ocorre principalmente devido a condições climáticas, já que meses mais chuvosos tornam o material mais úmido, diminuindo a eficiência da etapa de peneiramento e, conseqüentemente, fazendo com que uma maior taxa de material seja considerada carga circulante e siga para a britagem terciária. Baseando-se em dados históricos, obtidos junto a área de S11D, de meses considerados secos e úmidos na região, são definidas

Tabela 3.1: EC01 - Dados dos alimentadores e correias transportadoras utilizadas na simulação.

Equipamento	Comprimento [m]	Largura da correia [m]	Posição do dispositivo de carregamento (X_{in}) [m]	Posição do dispositivo de descarregamento (X_{out}) [m]	Diâmetro da polia motora [m]	Velocidade nominal [m/s]	Capacidade nominal [t/h]
Alimentadores (para britadores de 500 t/h)	11,9	1,2	3,5	11,9	0,8	0,24	780
Alimentadores (para britadores de 750 t/h)	11,9	1,2	3,5	11,9	0,8	0,41	1074
Correia transportadora	416,0	1,6	69,0	416,0	1,0	3,35	5360

Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

as condições apresentadas na Figura 3.9 que descrevem a amplitude dos valores de taxa de alimentação da área.



(a) Condição 1: Taxa de alimentação alta.

(b) Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

Figura 3.9: EC01 - Taxas de alimentação simuladas.

Fonte: O autor.

Para cada um dos cenários testados são coletados dados dos níveis individuais dos silos, nível médio dos silos ativos, tempo de utilização dos britadores e a taxa total de saída por cenário. Com estes dados, é realizada uma comparação entre cenários, considerando as duas condições de taxa de alimentação e buscando-se a configuração que apresente a melhor combinação de resultados.

3.5.2. Resultados e Discussão

As simulações foram realizadas para os Cenários 0 a 6, considerando as duas condições de taxa de alimentação em cada um deles. Cada cenário foi simulado para um tempo de 300 minutos de operação. As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam os níveis individuais dos silos para cada cenário, com as condições de taxa de alimentação alta e baixa, respectivamente. O nível médio

dos silos ativos também é apresentado em cada cenário. Os períodos em que o nível do silo está acima do limite mínimo e não apresenta variação indicam que a lógica que calcula o número de silos necessários atuou desligando o britador que é alimentado pelo respectivo silo.

Pela Figura 3.10, pode ser observado que o Cenário 0 não é capaz de dar a vazão necessária em uma condição de taxa alta. Isso já era esperado pelo fato da média da taxa de alimentação ser de 2478 t/h, enquanto que a vazão total que os quatro britadores de menor capacidade pode permitir é de 2000 t/h. Ainda observando as condições de taxa alta de alimentação, nota-se que os Cenários 3 e 5 dificultaram a distribuição de material entre silos, já que em cada um desses cenários houve um silo em que o nível de material atingiu 100% da altura máxima. É importante lembrar que nos Cenários 1 a 6, a vazão total que os quatro britadores pode permitir é no mínimo 2500 t/h, isto é, maior que a média da taxa de alimentação alta considerada.

Analisando agora a condição de taxa de alimentação baixa na Figura 3.11, tem-se uma maior atuação da lógica que calcula o número de silos necessários, apresentando, inclusive, situações em que algum dos britadores se manteve desligado por toda a simulação. No Cenário 3, o nível individual de um dos silos se aproximou de 100% da altura máxima, mostrando que este cenário não permitiu uma boa distribuição de material entre silos, já que sua capacidade de vazão era 738 t/h maior que a média da taxa de alimentação simulada.

Na Figura 3.12 o nível médio dos silos ativos é apresentado em um diagrama de caixa para cada cenário, considerando as duas condições de taxa de alimentação. Para a condição de taxa de alimentação alta, os Cenários 0 a 3 apresentaram mediana entre 57% e 94%, isto é, medianas maiores que o nível médio inicial da simulação (50%). Isto quer dizer que estes cenários apresentam uma má distribuição de material entre silos, já que mostram tendência de acumular material e de não conseguir dar vazão pelo menos à mesma taxa em que o material é alimentado. Para a condição de taxa baixa de alimentação, as medianas se mostraram bem próximas ao nível inicial, variando entre 49% e 53%. A diferença entre os cenários para essa condição está associada principalmente à amplitude da variação do nível médio, como pode ser observado pela comparação entre o primeiro e o terceiro quartil do diagrama de caixa, e também dos limites superiores e inferiores. Nessa comparação, destaca-se o Cenário 5 que apresentou o limite superior aproximadamente 4,6% maior que os demais cenários, indicando que houve uma maior elevação do nível nesse cenário devida a uma má distribuição de material nos silos.

A Figura 3.13 apresenta o tempo de operação dos alimentadores em forma de porcentagem do tempo simulado. Alimentadores que apresentam tempo de operação menor que 100% indicam a ocorrência de intertravamento por nível baixo ou a atuação da lógica que calcula o número de silos necessários, removendo temporariamente um dos britadores. Como essa lógica inicia desligando o Britador 4 e, para a condição de taxa de alimentação alta, nenhum dos cenários possui capacidade de dar vazão à taxa de alimentação com apenas três britadores, uma das características do cenário que permite uma boa distribuição de material nos silos é a utilização dos Britadores 1 a 3 por 100% do tempo simulado. Dessa forma, nesse cenário de boa distribuição, o Britador 4 trabalharia em 100% do tempo no Cenário 0; 96% no Cenário 1;

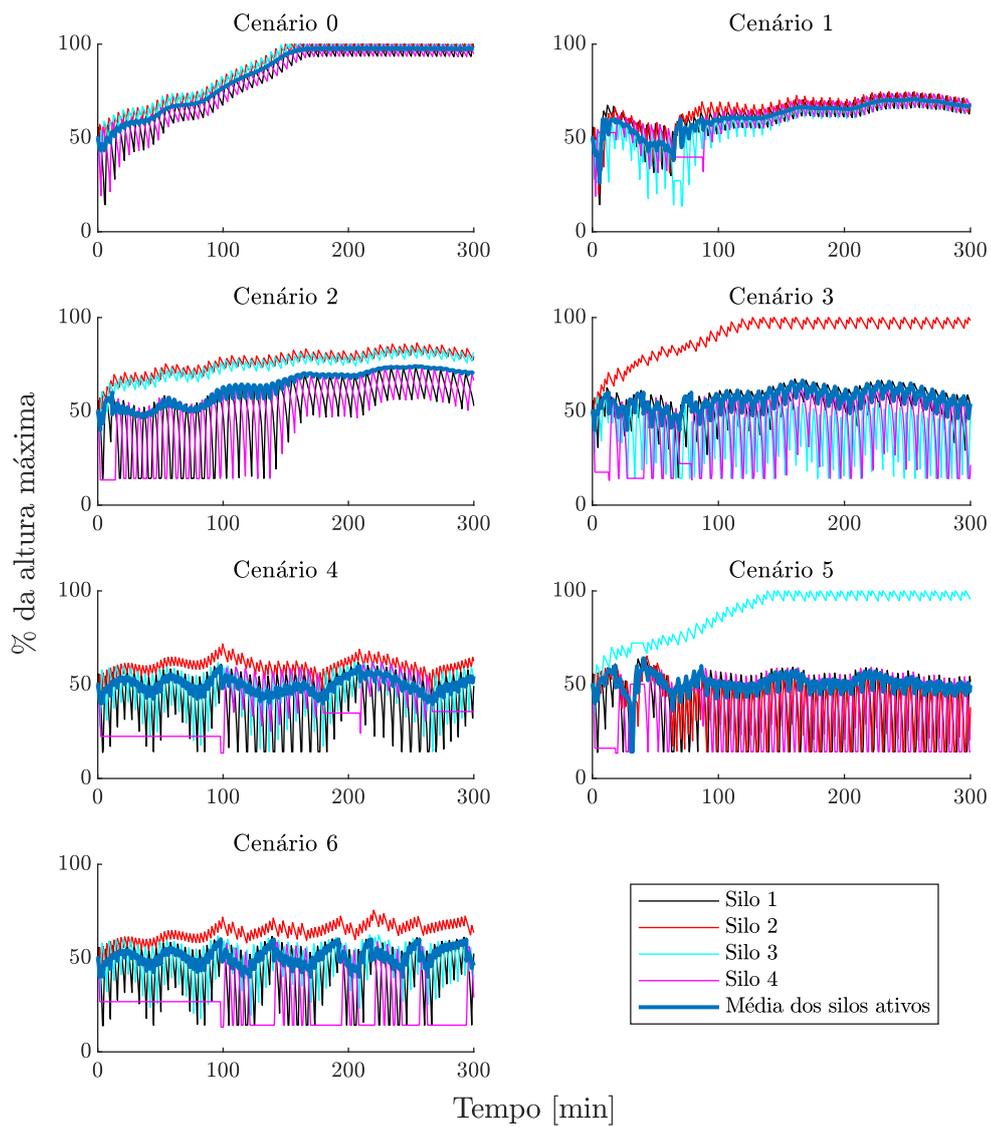


Figura 3.10: EC01 - Níveis individuais dos silos - Condição de taxa de alimentação alta.
 Fonte: O autor.

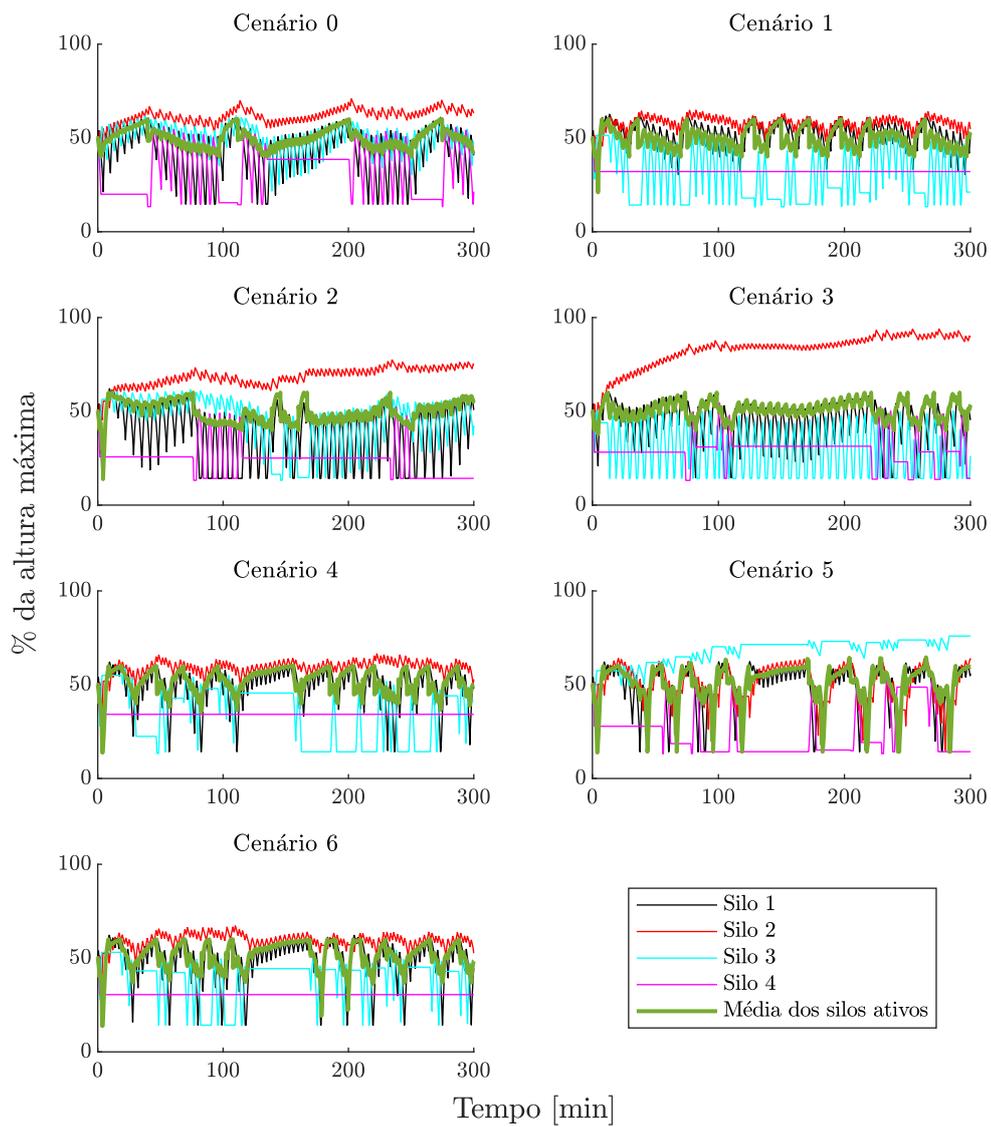
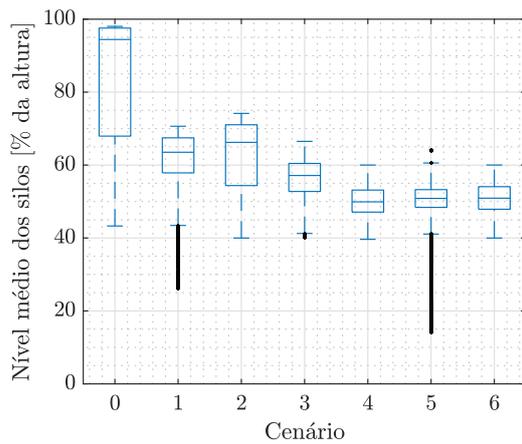
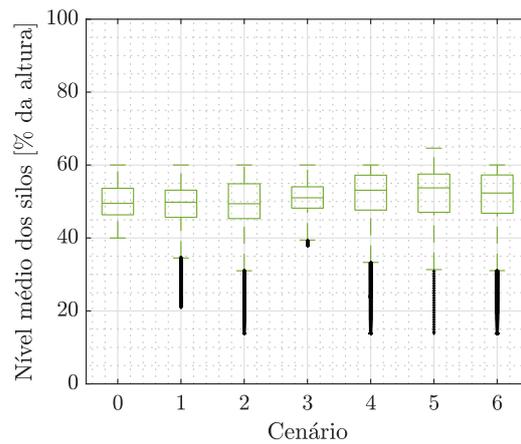


Figura 3.11: EC01 - Níveis individuais dos silos - Condição de taxa de alimentação baixa.
 Fonte: O autor.



(a) Condição 1: Taxa de alimentação alta.



(b) Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

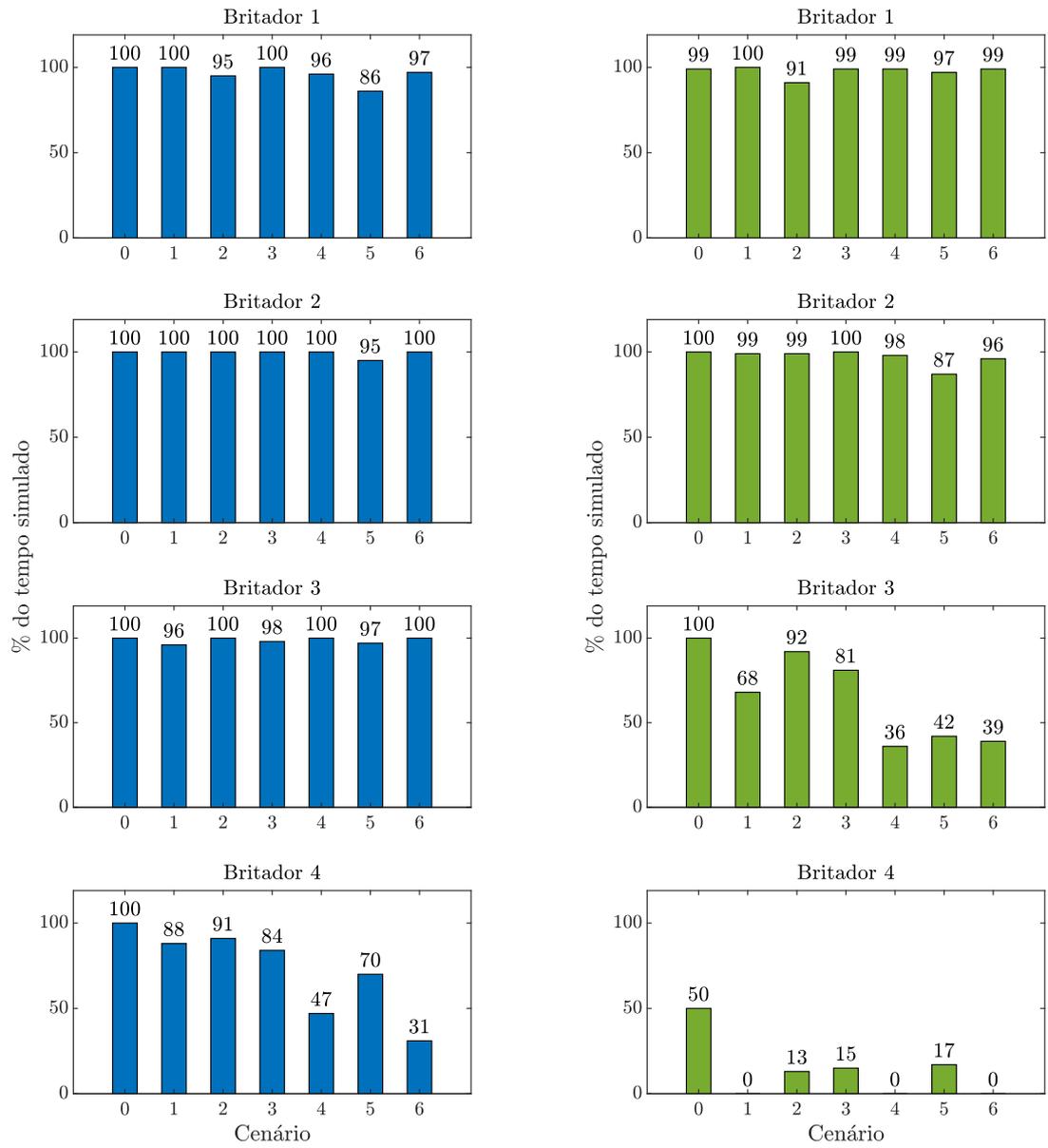
Figura 3.12: EC01 - Nível médio dos silos ativos.

Fonte: O autor.

97% nos Cenários 2 e 3; 46% no Cenário 4; 64% no Cenário 5; e 30% no Cenário 6. Com a simulação, observou-se nos Cenários 1 a 3 que o tempo de operação do Britador 4 foi menor que o esperado para uma boa distribuição de material entre os silos, indicando que, apesar das configurações permitirem dar vazão a toda taxa de alimentação, não foi isso que ocorreu. Já no Cenário 5, em que o tempo de operação foi maior que o desejado, isso indica que os demais britadores acabaram recebendo menos material que o esperado e intertravaram por nível mínimo, fazendo com que o Britador 4 precisasse ser utilizado por mais tempo.

Realizando agora a análise da condição de taxa de alimentação baixa, com exceção dos Cenários 0, 2 e 3, todos os demais não necessitam ligar o Britador 4 para dar vazão à taxa utilizada. Dessa forma, já se é possível notar uma má distribuição de material no Cenário 5. Para os Cenários 2 e 3, o Britador 4 não teria necessidade de estar ligado por mais que 2% do tempo simulado e, portanto, esses cenários também apresentam má distribuição. No Cenário 0, era esperado que o Britador 4 se mantivesse ligado por 52% do tempo. Também era esperado que os Britadores 1 e 2 trabalhassem em 100% do tempo simulado em todos os cenários. Com isso, as taxas esperadas para o Britador 3 são 100% para o Cenário 0, 68% para o Cenário 1, 100% para os Cenários 2 e 3, 35% no Cenário 4, 52% no Cenário 5 e 35% no Cenário 6. Isto é, para a simulação realizada com condição de taxa de alimentação baixa, os Cenários 1 e 4 foram os que melhor gerenciaram os tempos de operação de cada britador.

Por fim, a taxa média de saída, isto é, a média da taxa de material britado durante toda a simulação, é apresentada na Figura 3.14. Para a condição de taxa de alimentação alta, todos os cenários apresentaram ganho de taxa de saída em relação ao Cenário 0, com destaque para os Cenários 4 e 5, que apresentaram ganho de aproximadamente 23% e foram os cenários em que a taxa de saída mais se aproximou da taxa de alimentação. Para a condição de taxa de alimentação baixa, apenas os Cenários 1, 2 e 4 apresentaram algum aumento de taxa de saída



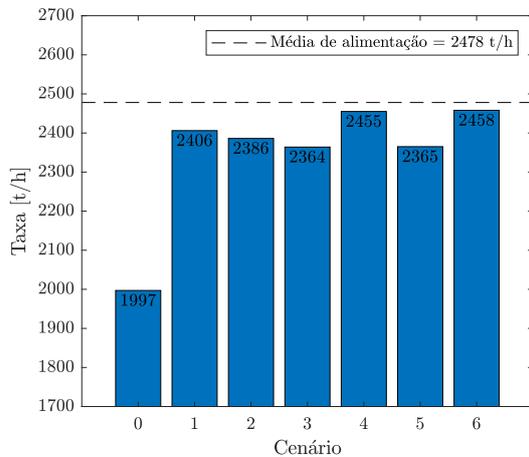
(a) Condição 1: Taxa de alimentação alta.

(b) Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

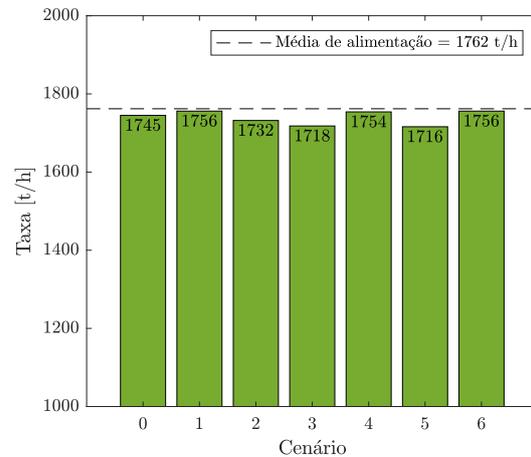
Figura 3.13: EC01 - Tempo de operação dos alimentadores.

Fonte: O autor.

com relação ao Cenário 0. Ainda assim, esse aumento observado se limitou a 0,6%.



(a) Condição 1: Taxa de alimentação alta.



(b) Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

Figura 3.14: EC01 - Taxa média de saída (Somatório da taxa média de saída dos britadores).

Fonte: O autor.

Após a análise de cada um dos critérios a serem considerados para comparação, é feita a classificação entre cenários. São considerados os seguintes parâmetros:

- Parâmetro A: soma do valor da mediana dos níveis individuais dos silos;
- Parâmetro B: mediana do nível médio dos silos ativos;
- Parâmetro C: somatório da diferença entre o tempo esperado de operação dos alimentadores e o tempo encontrado na simulação;
- Parâmetro D: taxa média de saída de material (somatório da taxa média de saída dos britadores).

Para os Parâmetros A, B e C, quanto menor seu valor, melhor ocorreu a distribuição de material nos silos. Para o Parâmetro D, quanto maior seu valor, melhor é o cenário analisado. Para a comparação, cada cenário recebe pontuações individuais por parâmetro, sendo que o cenário com melhor desempenho para aquele parâmetro recebe pontuação 10 e o pior recebe pontuação zero, enquanto os demais recebem pontuação proporcional. As Tabelas 3.2 e 3.3 trazem as pontuações obtidas por cada cenário nas condições de taxa de alimentação alta e baixa, respectivamente. Decidiu-se utilizar pesos diferentes para os parâmetros na média ponderada realizada para calcular a pontuação final com base nas seguintes informações: o principal ganho da troca de britadores é o aumento da produtividade, portanto, parâmetros relacionados à taxa de produto recebem maior peso; subutilização e paradas desnecessárias em excesso não são situações desejáveis, dessa forma, parâmetros relacionados à utilização dos equipamentos têm peso intermediário; por fim, a boa distribuição de material nos silos é uma das formas de se elevar a produtividade e o tempo de utilização dos equipamentos e, por serem condições

já tratadas nos itens anteriores, os parâmetros relacionados à essa condição recebem peso menor. Apesar de menor peso que os demais, esses parâmetros também são importantes pois mostram as tendências de variabilidade no nível dos silos. Então, os Parâmetros A e B, relacionados à distribuição de material nos silos, têm peso 1; o Parâmetro C, relacionado ao tempo de utilização, tem peso 2; e o Parâmetro D, associado à produtividade, tem peso 6.

Tabela 3.2: EC01 - Pontuação para os cenários - Condição 1: Taxa de alimentação alta.

Cenário (Combinação)	Pontuação por Parâmetros				Pontuação Final (A+B+2C+6D)/10
	A	B	C	D	
0 (500 / 500 / 500 / 500)	0,0	0,0	10,0	0,0	2,0
1 (500 / 750 / 750 / 500)	6,6	6,8	5,7	8,9	7,8
2 (750 / 500 / 500 / 750)	5,8	6,4	6,1	8,4	7,5
3 (500 / 500 / 750 / 750)	7,6	8,4	4,6	8,0	7,3
4 (750 / 750 / 750 / 500)	9,9	10,0	8,2	9,9	9,6
5 (750 / 750 / 500 / 750)	8,4	9,8	0,0	8,0	6,6
6 (750 / 750 / 750 / 750)	10,0	9,8	8,6	10,0	9,7

Fonte: O autor.

Tabela 3.3: EC01 - Pontuação para os cenários - Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

Cenário (Combinação)	Pontuação por Parâmetros				Pontuação Final (A+B+2C+6D)/10
	A	B	C	D	
0 (500 / 500 / 500 / 500)	0,0	8,0	9,4	7,3	7,0
1 (500 / 750 / 750 / 500)	10,0	8,0	10,0	10,0	9,8
2 (750 / 500 / 500 / 750)	5,8	10,0	1,3	4,0	4,2
3 (500 / 500 / 750 / 750)	2,1	6,0	0,0	0,5	1,1
4 (750 / 750 / 750 / 500)	4,2	2,0	9,1	9,5	8,2
5 (750 / 750 / 500 / 750)	0,8	0,0	2,2	0,0	0,5
6 (750 / 750 / 750 / 750)	5,0	4,0	7,5	10,0	8,4

Fonte: O autor.

Analisando os dados, as pontuações finais mostram o Cenário 6 como o melhor cenário para a condição de taxa de alimentação alta e o segundo melhor para a condição de taxa de alimentação baixa. Porém, em ambas condições, esse cenário está muito próximo do Cenário 4, mostrando que, para as condições simuladas, a troca de três britadores pode ser suficiente para obter resultado semelhante ao que pode ser obtido com a troca dos quatro britadores. A análise das pontuações também mostra que, caso sejam considerados fatores não analisados nesse trabalho (financeiros, por exemplo) e que seja possível a troca apenas de dois britadores, o Cenário 1 é a melhor opção, mostrando bons resultados em ambas condições de taxa de alimentação.

Aplicação real em S11D

Baseando-se na simulação apresentada nessa dissertação, a equipe de S11D optou por utilizar o Cenário 4. Portanto, os três britadores de maior capacidade foram posicionados nas três primeiras posições das Usinas 1 e 2. Até o momento, foram comprados seis britadores novos e, portanto, por decisão da equipe de S11D, a Usina 3 se manteve com o Cenário 0, isto é, sem realizar a troca de britadores. Dados de produtividade média diária foram fornecidos pela área de S11D e são apresentados na Figura 3.15, em que se considera que a troca dos britadores ocorreu na segunda semana de maio de 2020. A parte dos dados apresentada antes da troca é referente à condição de taxa de alimentação baixa, em que a média de taxa registrada foi próxima ao valor obtido nas simulações realizadas para essa condição: 1745 t/h para o Cenário 0 simulado (Figura 3.14b) e 1696 t/h para o Cenário 0 real (média das três usinas). A troca dos britadores ocorreu no início do período em que a condição é de taxa de alimentação alta, dessa forma, compara-se a taxa de 1997 t/h obtidas no Cenário 0 simulado (Figura 3.14a) com a taxa de 2056 t/h do Cenário 0 real (apenas a Usina 3). Com relação ao Cenário 4 na condição de taxa de alimentação alta, o valor de taxa obtido para ele na simulação foi de 2455 t/h, enquanto a taxa do Cenário 4 real foi de 2356 t/h (média das Usinas 1 e 2). Considerando que os resultados reais são influenciados por paradas dos equipamentos devido a condições que não foram incluídas na simulação (manutenção mecânica, falhas de comunicação, ocorrências de parada dos equipamentos à jusante e à montante da área de britagem terciária, entre outros), a simulação ainda foi capaz de aproximar, com erro médio de até 4%, os cenários de interesse e possibilitou a escolha do cenário que trouxe aumento da produtividade para o circuito.

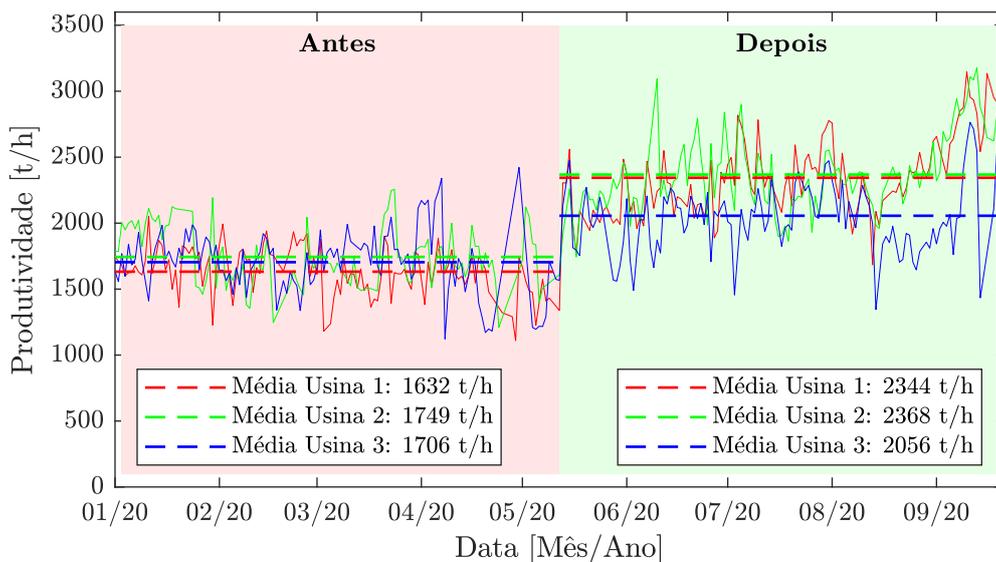


Figura 3.15: EC01 - Produtividade média diária real das Usinas de S11D.

Fonte: O autor.

3.6. Estudo de Caso 02: Alteração da velocidade máxima de translação do sistema de correia com cabeça móvel

Com relação ao estudo de caso em que é analisada a alteração da velocidade máxima de translação da cabeça móvel, as subseções seguintes trazem a definição de cenários e os parâmetros utilizados na simulação, os resultados e as discussões sobre o que foi observado.

3.6.1. Definições de cenários e parâmetros utilizados

Considera-se inicialmente que a velocidade máxima de translação do sistema de cabeça móvel é de 5,87 m/min e que a área de S11D projeta a alteração dessa velocidade para, no máximo, 11,00 m/min. Diante disso, além das velocidades de 5,87 m/min e 11,00 m/min, foi decidido simular cenários com velocidades intermediárias, conforme apresentado na Tabela 3.4. Como a correia que alimenta os silos tem capacidade nominal de 18600 t/h, decidiu-se simular uma alimentação com taxa média próxima a esse valor e pico máximo de 21000 t/h, que é a taxa máxima permitida para a correia. Na simulação em que o material segue pela rota alternativa com limite de 5600 t/h por linha, a taxa máxima de saída (16800 t/h, considerando a existência de três linhas) é menor que a taxa de alimentação e provavelmente causará intertravamentos pelo nível dos silos. Dessa forma, também é simulada outra taxa de entrada, dessa vez com média de 16800 t/h, para considerar uma situação em haja igualdade entre a taxa de entrada e a taxa máxima possível de saída.

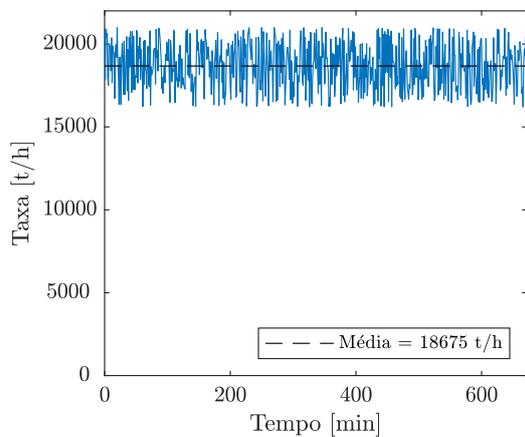
Tabela 3.4: EC02 - Cenários.

	Cenário						
	0	1	2	3	4	5	6
Velocidade máxima [m/min]	5,87	7,15	8,44	9,08	9,72	10,36	11,00

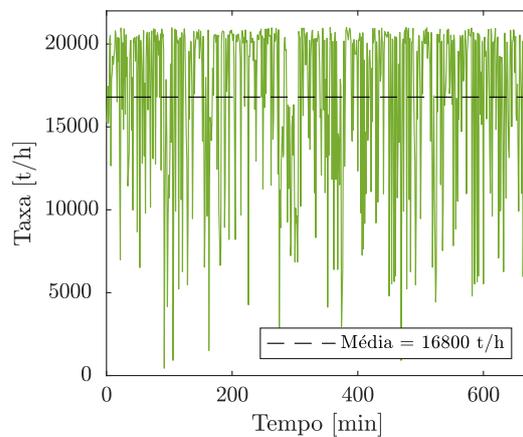
Fonte: O autor.

No circuito desenvolvido no software IDEAS® e apresentado na Figura 3.17 são utilizados os seguintes parâmetros para cada equipamento:

- Correia transportadora com cabeça móvel: considera-se que o cabeça móvel tenha curso total de 44,030 m e que a indicação de que ele esteja posicionado sobre determinado silo seja feita considerando os intervalos a seguir (onde X_{CM} indica a posição atual do cabeça móvel em metros): Silo 1: $0 \leq X_{CM} \leq 6,715$; Silo 2: $6,715 < X_{CM} \leq 15,215$; Silo 3: $15,215 < X_{CM} \leq 23,715$; Silo 4: $23,715 < X_{CM} \leq 32,215$; Silo 5: $32,215 < X_{CM} \leq 40,715$; Silo 6: $40,715 < X_{CM} \leq 44,030$. O limite inferior da velocidade de translação é 30% do limite superior, isto é, a velocidade máxima de translação definida em cada cenário. O valor a ser utilizado é definido conforme a lógica existente



(a) Condição 1: Taxa de alimentação alta.



(b) Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

Figura 3.16: EC02 - Taxas de alimentação simuladas.

Fonte: O autor.

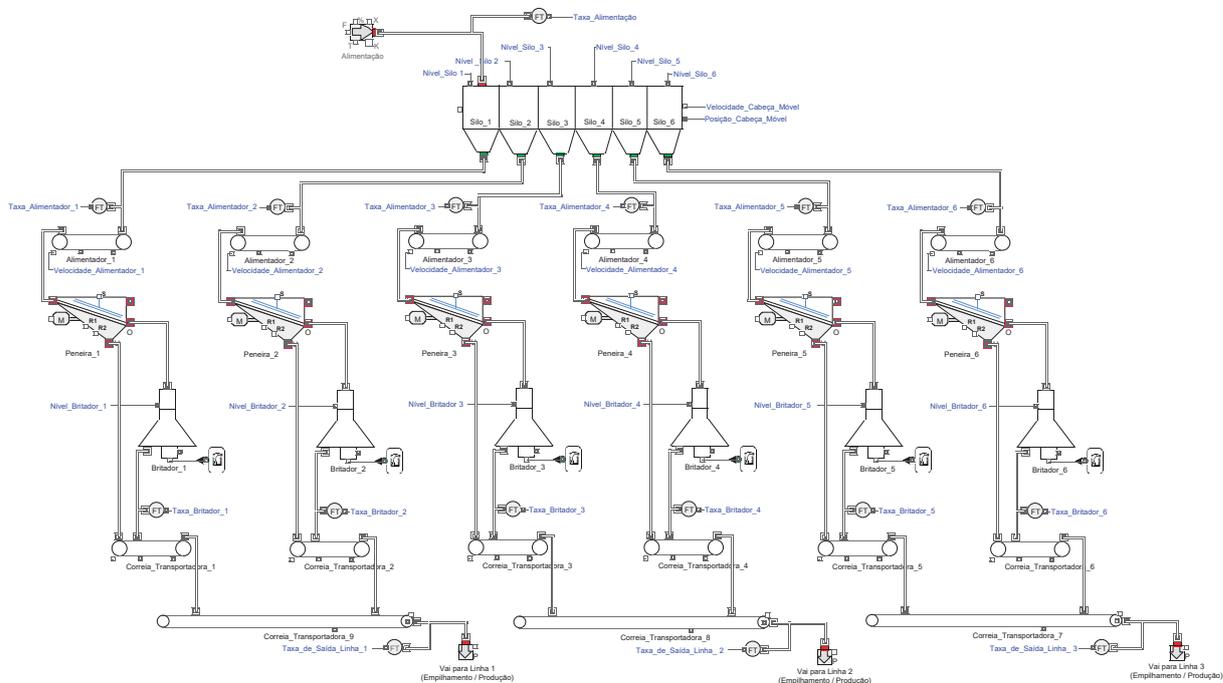


Figura 3.17: EC02 - Circuito de britagem secundária e peneiramento primário de S11D desenvolvido no software IDEAS®.

Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

para distribuição de material nos silos descrita na Subseção 2.2.1 e a descarga de material ocorre em ambos sentidos de translação. Como o foco da simulação se dá a partir da distribuição do material nos silos, essa correia em si pôde ser desconsiderada nesse estudo. Portanto, a simulação se inicia a partir do ponto de descarga desse equipamento.

- Silos: os seis silos do peneiramento primário/britagem secundária de S11D são do tipo tanque incompressível, sem comunicação entre si, com capacidade de 516,0 m³ cada e altura de 12,9 m. Na simulação, cada um deles é inicialmente preenchido com material em 50% do nível. Considera-se que a entrada de material ocorre ao nível da altura do silo (12,9 m), com a saída para o alimentador ao nível do fundo do silo (0,0 m). Esses silos possuem geometria irregular, sendo que a relação entre altura do silo e volume acumulado é apresentada na Figura 3.18. Cada silo possui dois medidores de nível do tipo ondas acústicas em posições diferentes, sendo que o maior valor entre eles é considerado o nível do silo utilizado nas lógicas e análises.

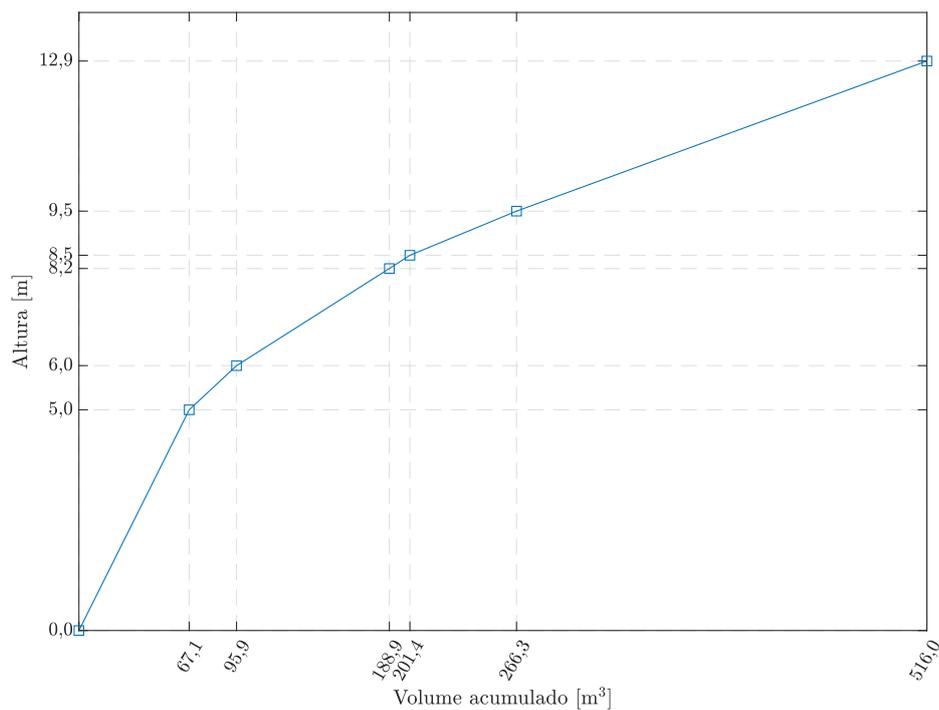


Figura 3.18: EC02 - Relação entre altura e volume acumulado dos silos.
 Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

- Peneiras: nessa simulação, o balanço de massa é o foco principal, não levando em consideração a granulometria do material. Além disso, nessa etapa de S11D, o material que sai pelo *overflow* da peneira se junta ao material do *underflow* logo após passar pelo britador, fechando o balanço de massa nesses equipamentos. Portanto, considerando que a peneira é projetada para trabalhar com a taxa utilizada nas simulações, ela não tem contribuição para os resultados encontrados.

- Britadores: como nessa simulação o foco é o balanço de massa e desconsideram-se questões relacionadas a granulometria, a única especificação necessária para o equipamento é a sua capacidade nominal de 650 t/h.
- Correias transportadoras e alimentadores: as correias transportadoras e os alimentadores utilizados possuem as especificações apresentadas na Tabela 3.5. As correias transportadoras 1 a 6 são as utilizadas para coletar o material da saída dos britadores e juntar com o *underflow* das peneiras e as correias transportadoras 7 a 9 são utilizadas para levar o material para a próxima etapa de beneficiamento. Cada correia transportadora possui dois pontos de entrada de material, ambos apresentados na Tabela 3.5 com o respectivo equipamento associado. A velocidade dos alimentadores está associada ao controle de taxa do destino e ao nível médio mínimo dos silos, como descrito na Subseção 2.2.1. No caso das correias transportadoras, elas trabalham em sua velocidade nominal em todo o tempo de simulação.

Tabela 3.5: EC02 - Dados dos alimentadores e correias transportadoras utilizadas na simulação.

Equipamento	Comprimento [m]	Largura da correia [m]	Posição do dispositivo de carregamento (X_{in}) [m]	Posição do dispositivo de descarregamento (X_{out}) [m]	Diâmetro da polia motora [m]	Velocidade nominal [m/s]	Capacidade nominal [t/h]
Alimentadores	16,2	2,4	8,4	16,2	1,3	0,4	3640
Correias transportadoras 1 a 6	20,9	1,6	7,7 (peneira) 13,9 (britador)	20,9	1,0	2,2	3640
Correias transportadoras 7 a 9	120,2	1,6	1,0 (1ª correia) 69,0 (2ª correia)	120,2	1,0	4,27	7280

Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

Para cada um dos cenários testados, são coletados dados dos níveis individuais dos silos, contagem de bloqueios da correia de alimentação, de intertravamentos por nível alto e baixo dos silos, de formação de ilhas e de taxa de saída de material. Com estes dados, é realizada uma comparação entre cenários, considerando as duas condições de taxa de alimentação e buscando-se a velocidade máxima de translação que apresente a melhor combinação de resultados.

3.6.2. Resultados e Discussão

As simulações foram realizadas para os Cenários 0 a 6, considerando as duas condições de taxa de alimentação em cada um deles. Cada cenário foi simulado para um tempo de 670 minutos de operação. Nas Figuras 3.19 e 3.20 são apresentados gráficos de caixa dos níveis individuais dos silos para cada cenário, com as condições de taxa de alimentação alta e baixa, respectivamente.

Na Figura 3.19 nota-se o esperado para a mediana dos níveis dos silos: como o destino simulado possui limite de taxa menor do que a taxa de alimentação, o nível de material

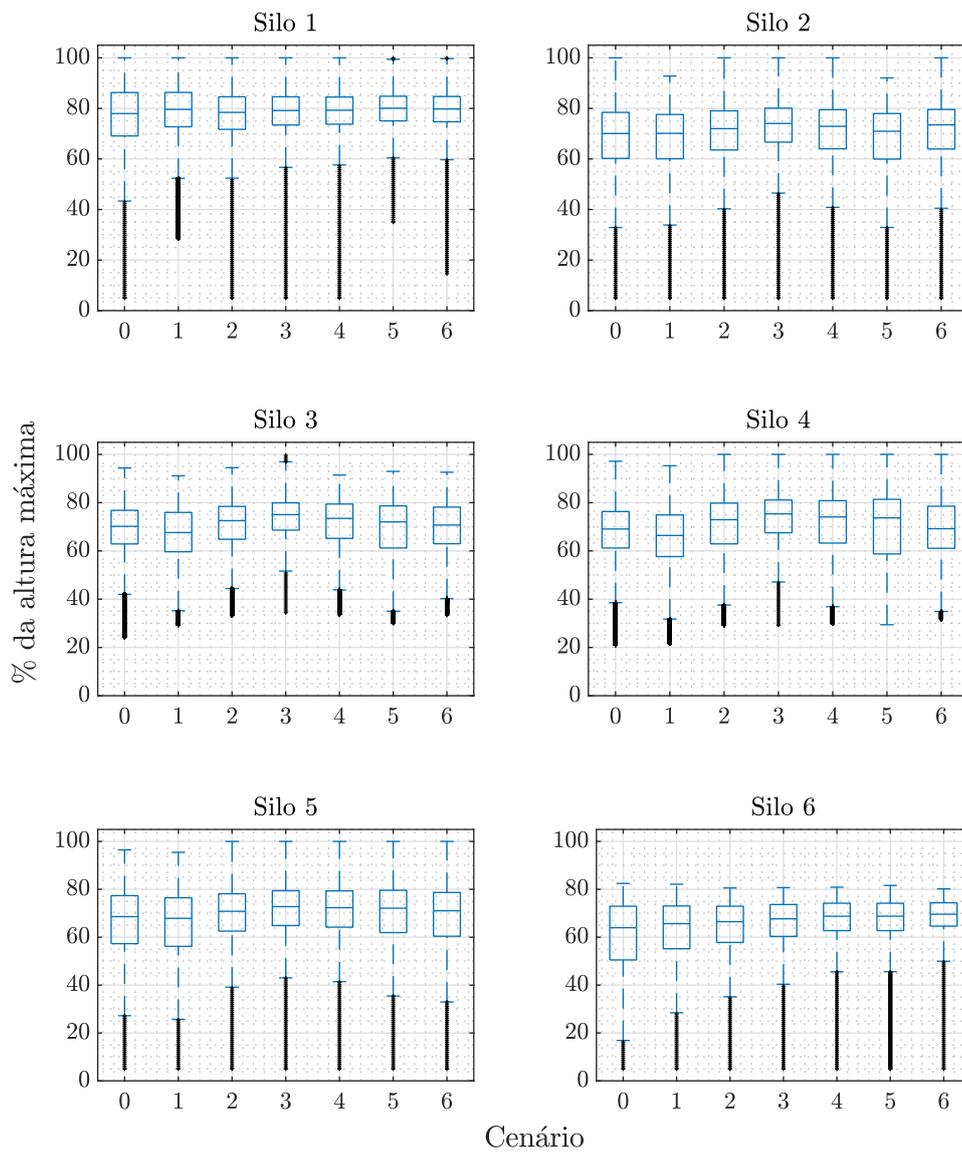


Figura 3.19: EC02 - Níveis individuais dos silos - Condição de taxa de alimentação alta.
 Fonte: O autor.

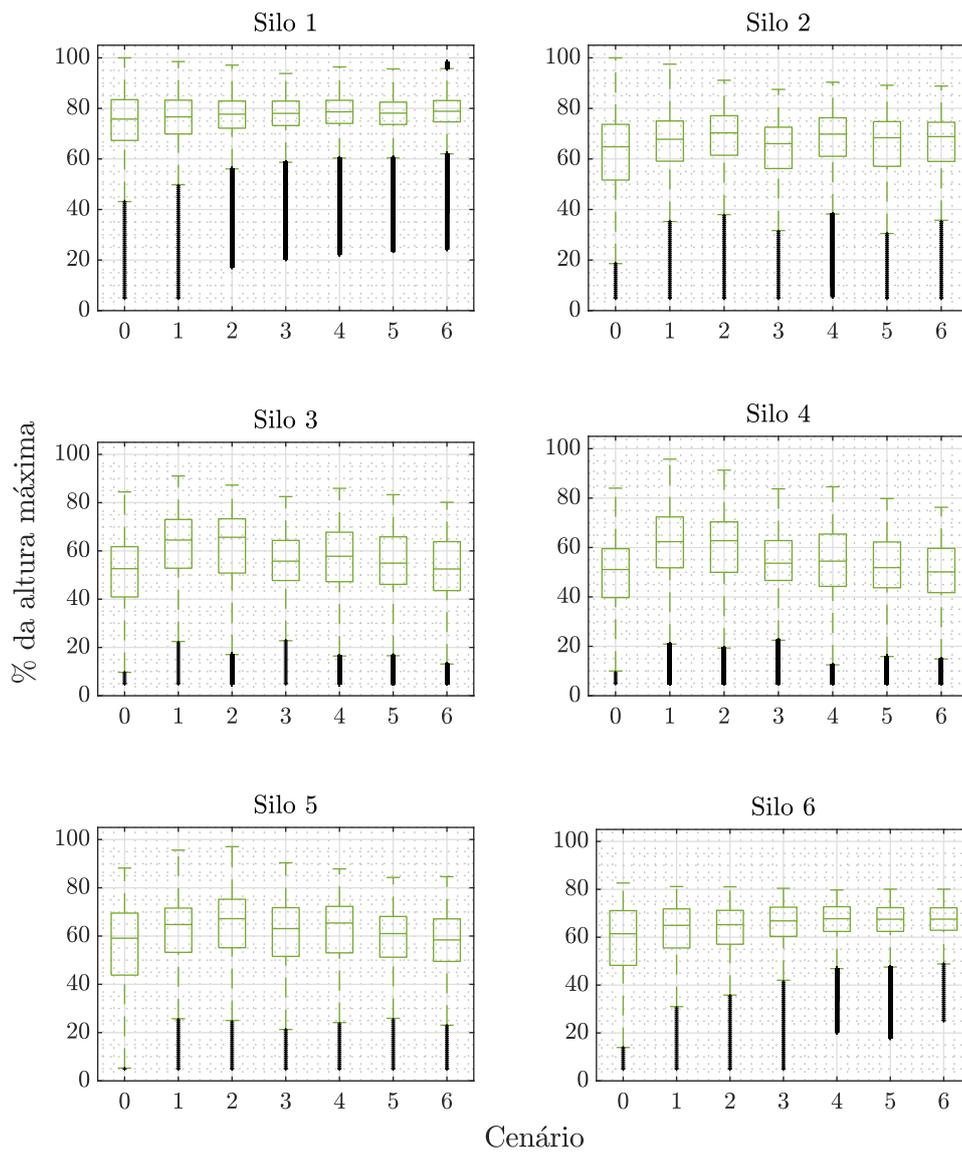


Figura 3.20: EC02 - Níveis individuais dos silos - Condição de taxa de alimentação baixa.
 Fonte: O autor.

nos silos se eleva e fica acima do nível inicial de 50% na maior parte do tempo. Observa-se também que, quanto maior a velocidade máxima permitida para translação do cabeça móvel, menor é a variabilidade do nível nos silos das pontas. Porém, essa relação não é válida para os silos centrais, em que se tem uma variabilidade menor no Cenário 3 e com maior mediana, enquanto o Cenário 1 apresenta medianas menores e maior variabilidade. Para a condição de taxa de alimentação baixa da Figura 3.20, enquanto o comportamento dos silos das pontas se mantém semelhante ao observado para a condição de taxa de alimentação alta, nos silos centrais a situação se inverte: o Cenário 3 agora apresenta uma das menores medianas em todos os silos centrais e o Cenário 1 passa a ter uma das maiores.

Com o nível se elevando, maiores são as chances de ocorrerem bloqueios de entrada de material nos silos devido ao nível alto, levando também ao bloqueio da correia de alimentação. Silos bloqueados podem alterar o percurso do cabeça móvel, fazendo com que ele deixe de alimentar silos que já estão se esvaziando e tenham sua saída de material bloqueada devido ao nível baixo. As Tabelas 3.6 e 3.7 trazem a porcentagem do tempo simulado em que tais bloqueios ocorreram. A entrada de material de um silo é considerada bloqueada devido ao nível alto a partir do instante em que seu nível atinge 100% até o momento em que ele volte a atingir 80% para os Silos 1, 2, 5 e 6 ou 83% para os Silos 3 e 4. A correia de alimentação é bloqueada caso qualquer um dos silos se encontre bloqueado por nível alto. Destaca-se aqui que o tempo de alimentação bloqueada não é simplesmente a soma dos tempos dos silos individuais bloqueados, já que pode haver mais de um silo bloqueado simultaneamente. Já o bloqueio por nível baixo ocorre por todo o tempo que o silo se mantiver com nível abaixo de 10%.

Tabela 3.6: EC02 - Bloqueios da alimentação e silos - Condição 1: Taxa de alimentação alta.

Cenário (Velocidade)	Alimentação bloqueada	[% do tempo simulado]											
		Silo bloqueado por nível baixo						Silo bloqueado por nível alto					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0 (5,87 m/min)	10,4	1,5	1,3	0,0	0,0	2,3	5,6	9,1	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1 (7,15 m/min)	10,9	0,0	1,2	0,0	0,0	1,8	4,6	10,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2 (8,44 m/min)	10,2	1,1	0,5	0,0	0,0	0,6	5,3	5,4	2,6	0,0	2,2	3,3	0,0
3 (9,08 m/min)	8,9	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	4,5	1,8	2,6	1,2	3,3	1,6	0,0
4 (9,72 m/min)	8,4	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	3,7	3,6	2,6	0,0	2,1	3,2	0,0
5 (10,36 m/min)	9,7	0,0	0,9	0,0	0,0	2,0	7,3	5,4	0,0	0,0	4,3	6,2	0,0
6 (11,00 m/min)	10,3	0,0	0,8	0,0	0,0	2,1	4,5	6,6	2,6	0,0	1,1	1,5	0,0

Fonte: O autor.

Observa-se que o Cenário 1, para a condição de taxa de alimentação alta, apesar de ser o que apresentou o menor número de silos bloqueados por nível alto, foi o cenário com maior tempo de alimentação bloqueada. Já o Cenário 4, além de ter o menor tempo de bloqueio da alimentação, também foi o que apresentou o menor tempo de bloqueio por nível baixo no Silo 6, mostrando uma melhor capacidade de distribuir material entre os silos do que os demais cenários. Para a condição de taxa de alimentação baixa, a principal observação é o fato de que o Cenário 0, que é a velocidade atual, é o único a bloquear silos por nível alto e, portanto, bloquear também a correia de alimentação.

Tabela 3.7: EC02 - Bloqueios da alimentação e silos - Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

Cenário (Velocidade)	[% do tempo simulado]												
	Alimentação bloqueada	Silo bloqueado por nível baixo						Silo bloqueado por nível alto					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0 (5,87 m/min)	7,4	1,6	4,7	6,8	7,3	10,0	4,6	6,1	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1 (7,15 m/min)	0,0	0,0	0,4	0,3	0,6	1,4	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2 (8,44 m/min)	0,0	0,0	0,5	0,2	0,4	1,2	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3 (9,08 m/min)	0,0	0,0	0,6	0,4	0,1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4 (9,72 m/min)	0,0	0,0	0,0	0,5	0,6	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5 (10,36 m/min)	0,0	0,0	0,8	0,1	0,2	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6 (11,00 m/min)	0,0	0,0	0,5	0,2	0,5	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: O autor.

Antes de ser bloqueado por nível alto, a lógica existente bloqueia o silo por limite de nível, obrigando o cabeça móvel a se deslocar para outro silo, de forma a evitar que se chegue ao limite máximo de 100%. Esse bloqueio por limite de nível ocorre no momento em que o silo atinge 85% para os Silos 1, 2, 5 e 6 ou 88% para os Silos 3 e 4, até o momento em que ele volte a atingir 80% para os Silos 1, 2, 5 e 6 ou 83% para os Silos 3 e 4. As Figuras 3.21 e 3.22 trazem a porcentagem do tempo da simulação em que nenhum dos silos, apenas um, ou mais de um silo em simultâneo foi bloqueado por esse limite de nível nas condições de taxa de alimentação alta e baixa, respectivamente. Para taxa de alimentação alta, apenas os Cenários 2 e 4 ficaram mais tempo que o Cenário 0 (velocidade máxima inicial) com nenhum silo bloqueado. Apesar disso, o Cenário 0 foi o que apresentou maior tempo de simulação com quatro silos bloqueados em simultâneo. Quanto maior o número de silos bloqueados em simultâneo, maior é a chance de ocorrer intertravamentos por nível baixo e nível alto, devido à dificuldade de distribuir o material de forma eficaz entre os silos. Já para a condição de taxa de alimentação baixa, os Cenários 3, 4, 5 e 6 se mantiveram por mais tempo sem silos bloqueados por limite de nível.

Uma situação em que um silo é bloqueado por limite de nível pode levar à ocorrência de ilhas. Na Tabela 3.8 é apresentada a contagem de ilhas que ocorreram em ambas as condições de taxa de alimentação. A contagem de ilhas é incrementada toda vez em que o cabeça móvel tenha sido obrigado a reverter o sentido de sua translação fora de seu ponto de início sobre o Silo 1 ou do seu ponto de fim sobre o Silo 6. A tabela também apresenta o tempo que se passou até a primeira ocorrência de ilha em cada um dos cenários. Para taxa de alimentação alta, o Cenário 0 apresentou menor contagem de ilhas e maior tempo até a primeira ocorrência de ilha, enquanto que para taxa de alimentação baixa, o Cenário 3 foi o que apresentou menor contagem de ilhas e maior tempo até primeira ocorrência.

Por fim, a taxa de saída, isto é, a taxa de material que segue para as três linhas de beneficiamento durante toda a simulação, é apresentada na Figura 3.23. Para a condição de taxa de alimentação alta, todos os cenários apresentaram ganho de taxa de saída em relação ao Cenário 0, sendo o Cenário 4 o que apresentou o maior ganho e foi o cenário em que a taxa de saída mais se aproximou à taxa máxima para produção, que é de 16800 t/h. Para a condição de taxa de alimentação baixa, o ganho com relação ao Cenário 0 foi ainda maior, sendo o maior

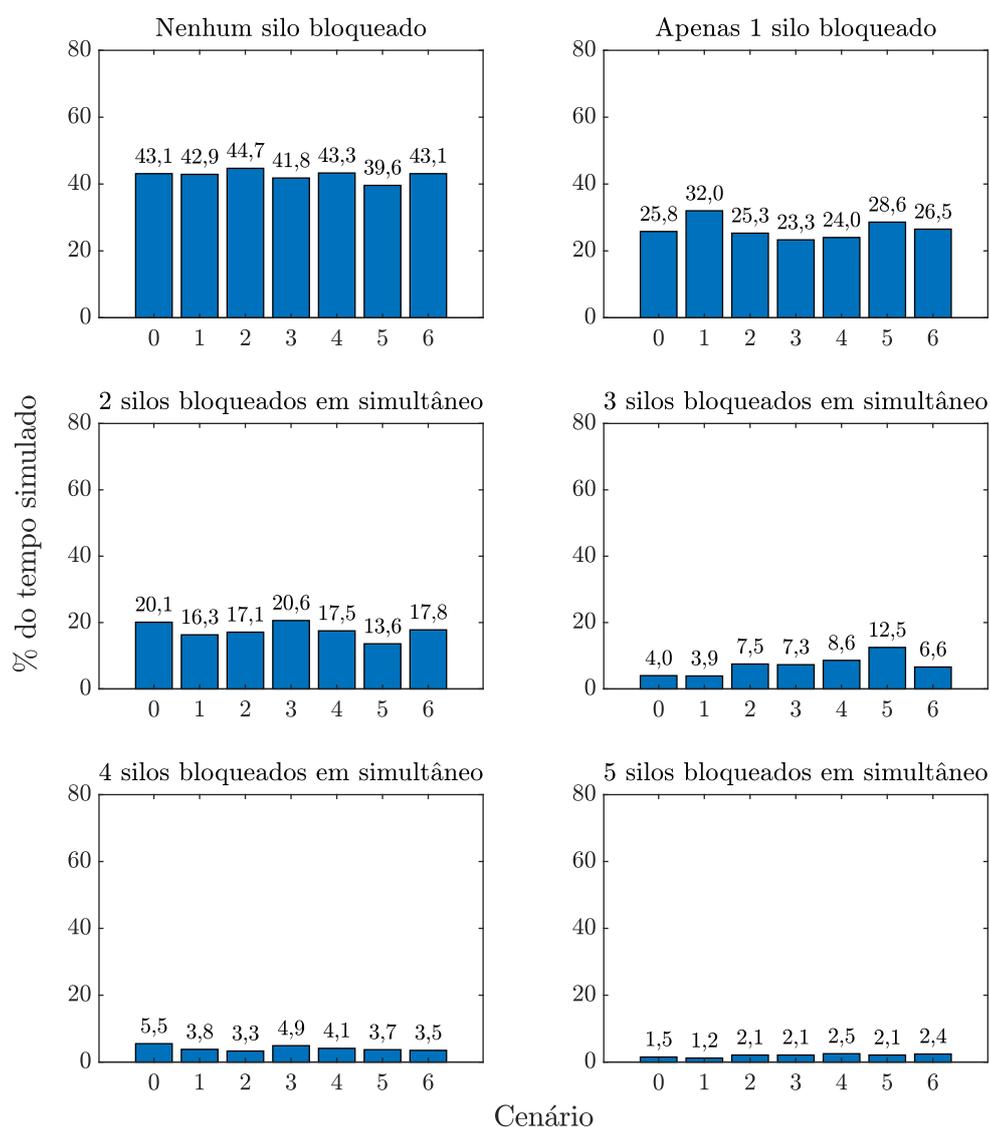


Figura 3.21: EC02 - Silos bloqueados por limite de nível - Condição de taxa de alimentação alta.

Fonte: O autor.

Tabela 3.8: EC02 - Ocorrências de ilhas.

Cenário (Velocidade)	Condição 1: Taxa de alimentação alta		Condição 2: Taxa de alimentação baixa	
	Contagem de ilhas	Tempo até primeira ocorrência de ilha [min]	Contagem de ilhas	Tempo até primeira ocorrência de ilha [min]
0 (5,87 m/min)	6	99,2	3	257,9
1 (7,15 m/min)	7	82,5	3	246,2
2 (8,44 m/min)	8	96,5	5	272,1
3 (9,08 m/min)	9	90,7	1	588,2
4 (9,72 m/min)	8	97,0	4	243,9
5 (10,36 m/min)	12	91,2	2	233,0
6 (11,00 m/min)	11	96,7	1	467,3

Fonte: O autor.

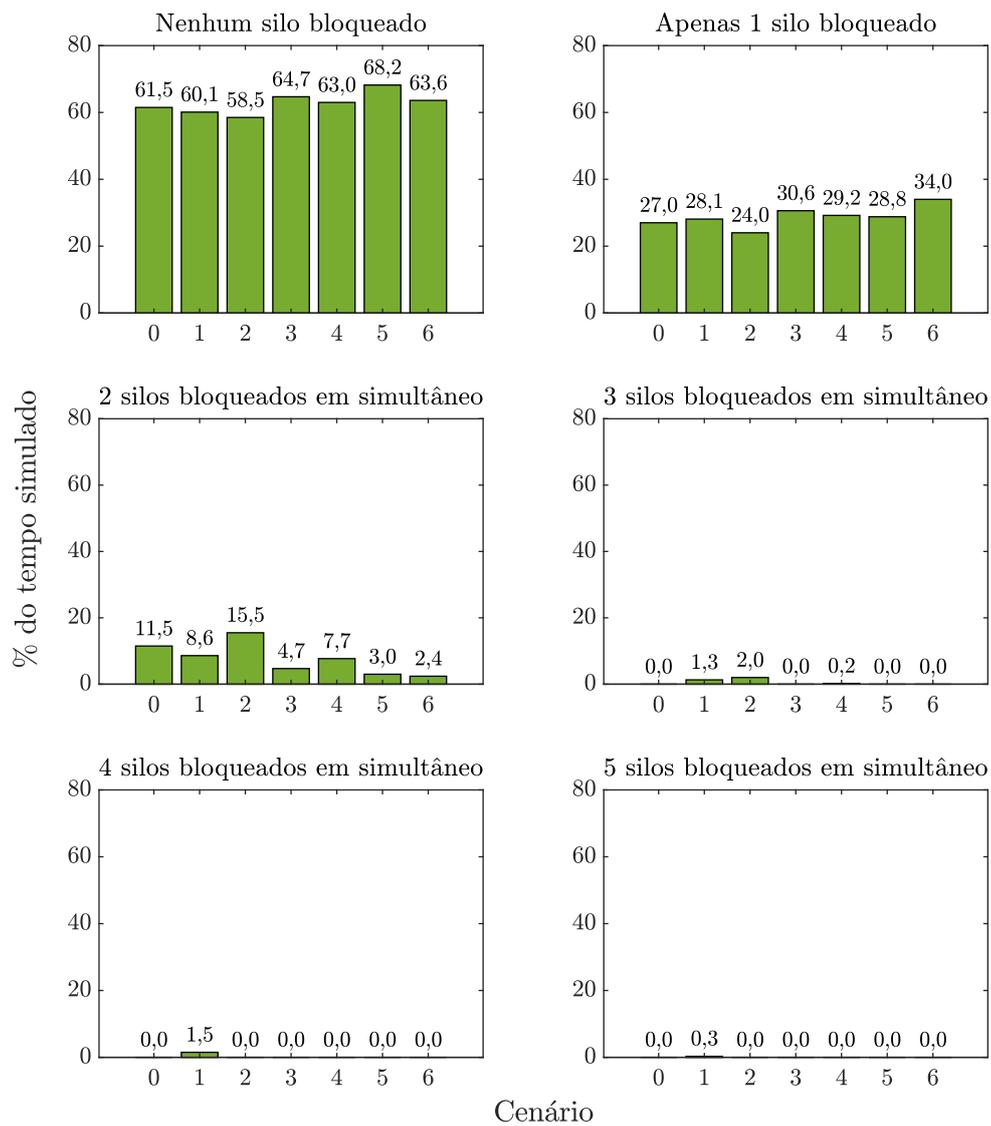
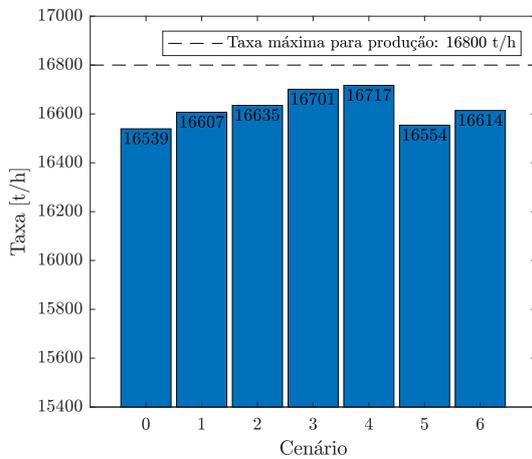


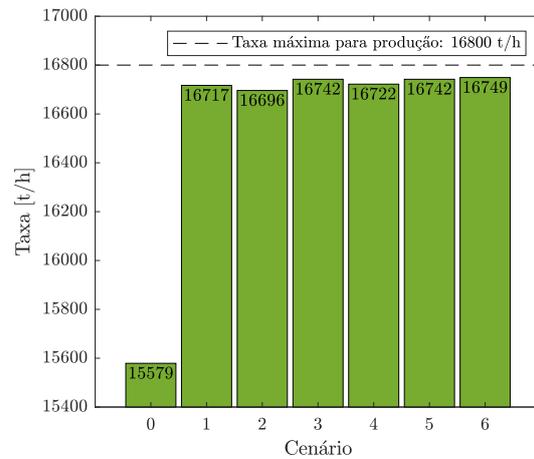
Figura 3.22: EC02 - Silos bloqueados por limite de nível - Condição de taxa de alimentação baixa.

Fonte: O autor.

deles obtido com o Cenário 6, com ganho na taxa de saída de 7,5%.



(a) Condição 1: Taxa de alimentação alta.



(b) Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

Figura 3.23: EC02 - Taxa de saída (Somatório das linhas).

Fonte: O autor.

Após a análise de cada um dos parâmetros a serem considerados para comparação, é feita a classificação entre cenários. São considerados os seguintes parâmetros:

- Parâmetro A: soma do valor da mediana dos níveis individuais dos silos;
- Parâmetro B: somatório da porcentagem de tempo em que houve bloqueio da alimentação e de silos por nível alto e baixo;
- Parâmetro C: somatório ponderado de bloqueios por limite de nível, em que a ponderação utiliza o número de silos bloqueados em simultâneo;
- Parâmetro D: contagem de ocorrência de ilhas;
- Parâmetro E: tempo decorrido até a primeira ocorrência de ilha;
- Parâmetro F: taxa de saída de material (somatório das linhas).

Para os Parâmetros A, B, C e D, quanto menor seu valor, melhor ocorreu a distribuição de material nos silos. Para os Parâmetros E e F, quanto maior seu valor, melhor é o cenário analisado. Para a comparação, cada cenário recebe pontuações individuais por parâmetro, sendo que o cenário com melhor desempenho para aquele parâmetro recebe pontuação 10 e o pior recebe pontuação zero, enquanto os demais recebem pontuação proporcional. As Tabelas 3.9 e 3.10 trazem as pontuações obtidas por cada cenário nas condições de taxa de alimentação alta e baixa, respectivamente. De forma semelhante ao estudo de caso anterior, decidiu-se utilizar pesos diferentes na média ponderada utilizada para calcular a pontuação final: a produtividade é o ganho principal da alteração da velocidade máxima e, dessa forma, o Parâmetro F tem peso

Tabela 3.9: EC02 - Pontuação para os cenários - Condição 1: Taxa de alimentação alta.

Cenário (Velocidade)	Pontuação por Parâmetros						Pontuação Final (A+B+C+D+E+5F)/10
	A	B	C	D	E	F	
0 (5,87 m/min)	9,0	3,6	8,4	10,0	10,0	0,0	4,1
1 (7,15 m/min)	10,0	5,4	10,0	8,3	0,0	3,8	5,3
2 (8,44 m/min)	4,1	3,9	8,7	6,7	8,4	5,4	5,9
3 (9,08 m/min)	0,0	9,7	6,9	5,0	4,9	9,1	7,2
4 (9,72 m/min)	1,2	10,0	7,4	6,7	8,7	10,0	8,4
5 (10,36 m/min)	2,7	0,0	0,0	0,0	5,2	0,8	1,2
6 (11,00 m/min)	3,8	5,3	8,3	1,7	8,5	4,2	4,9

Fonte: O autor.

Tabela 3.10: EC02 - Pontuação para os cenários - Condição 2: Taxa de alimentação baixa.

Cenário (Velocidade)	Pontuação por Parâmetros						Pontuação Final (A+B+C+D+E+5F)/10
	A	B	C	D	E	F	
0 (5,87 m/min)	10,0	0,0	4,2	5,0	0,7	0,0	2,0
1 (7,15 m/min)	1,8	9,7	1,6	5,0	0,4	9,7	6,7
2 (8,44 m/min)	0,0	9,5	0,0	0,0	1,1	9,5	5,8
3 (9,08 m/min)	5,8	10,0	8,0	10,0	10,0	9,9	9,3
4 (9,72 m/min)	3,4	9,8	6,0	2,5	0,3	9,8	7,1
5 (10,36 m/min)	6,2	10,0	10,0	7,5	0,0	9,9	8,3
6 (11,00 m/min)	7,4	10,0	8,5	10,0	6,6	10,0	9,2

Fonte: O autor.

maior que os demais: peso 5; os demais parâmetros estão relacionados à distribuição de material nos silos e têm peso 1.

As pontuações obtidas mostram que o Cenário 4 permitiu a melhor distribuição de material nos silos para a condição de taxa de alimentação alta, enquanto o Cenário 3 se mostrou melhor em uma condição de taxa de alimentação baixa. Nota-se também que os Cenários 5 e 6 apresentaram bom desempenho na condição de taxa de alimentação baixa, porém está entre os piores para a condição de taxa de alimentação alta, dessa forma, tais cenários devem ser descartados. Portanto, considerando como prioridade uma melhor distribuição em condições de taxa de alimentação alta, o Cenário 4, com velocidade máxima de translação do cabeça móvel igual a 9,72 m/min, deve ser o escolhido. Pode-se ainda considerar a possibilidade de alterar para o Cenário 3, com velocidade máxima de translação do cabeça móvel igual a 9,08 m/min, nos períodos do ano em que a condição de taxa de alimentação for mais baixa.

Aplicação real em S11D

Os estudos foram apresentados para a equipe de S11D, mas, infelizmente, até a conclusão da escrita dessa dissertação ainda não havia sido realizada a troca dos equipamentos de campo por outros que permitam que o cabeça móvel atinja uma velocidade de translação maior. Essa é uma etapa necessária para que a velocidade sugerida nessa dissertação possa ser implementada.

3.7. Estudo de Caso 03: Substituição de estratégia de controle da velocidade dos alimentadores

Com relação ao estudo de caso em que é analisada a substituição da estratégia de controle utilizada no peneiramento secundário, as subseções seguintes trazem a definição de cenários e os parâmetros utilizados na simulação, os resultados e as discussões sobre o que foi observado.

3.7.1. Definições de cenários e parâmetros utilizados

Basicamente, dois cenários são comparados nesse estudo de caso: o primeiro é o método atual de S11D, utilizando o controlador baseado em regras descrito na Subseção 2.2.2, e o segundo é o método proposto nesse trabalho, utilizando o controlador em *override*. O controle em *override* apresenta a vantagem de, quando há menos variáveis a serem manipuladas que variáveis a serem controladas, permitir controlar uma variável até que a outra atinja seu valor máximo permitido, momento esse em que esta restrição é ativada e a outra variável deixa de ser controlada (CAMPOS & TEIXEIRA, 2010). Com isso, a planta continua em operação dentro das condições de segurança.

O controlador baseado em regras foi implementado no software MATLAB[®], realizando comunicação via OPC com o software IDEAS[®], onde os equipamentos da usina foram modelados. O Algoritmo 1 e os parâmetros Tabela 2.1, apresentados na Subseção 2.2.2, foram representados no MATLAB[®], de forma a permitir que a simulação tenha comportamento semelhante ao comportamento do controle real da planta.

Para o cenário com o método proposto, foram projetados dois controladores do tipo PI, como apresentado na Figura 3.24, sendo um associado à correia do *underflow* e outro associado à correia do *overflow*. O controlador recebe a taxa da correia como variável de processo e utiliza o Limite Superior de Controle (LSC), o mesmo valor da solução baseada em regras, como referência a ser buscada. O menor valor entre as saídas dos dois controladores é utilizado como variável manipulada, isto é, a velocidade do alimentador. O ganho proporcional (K_P), o ganho integrativo (K_I) e a referência (SP), utilizados para cada controlador, estão definidos na Tabela 3.11. Os parâmetros K_P e K_I foram sintonizados utilizando a *toolbox* PID Tuner do software MATLAB[®], buscando reduzir o sobressinal e o tempo de acomodação das taxas de material nas correias após a aplicação de uma alteração em degrau na referência de taxa. Utilizando o conceito de simulação HIL, o controlador foi implementado no software Compact Control Builder[®], da ABB, para execução em hardware — o SDCD 800xA, também da ABB — e comunicando-se com o software IDEAS[®].

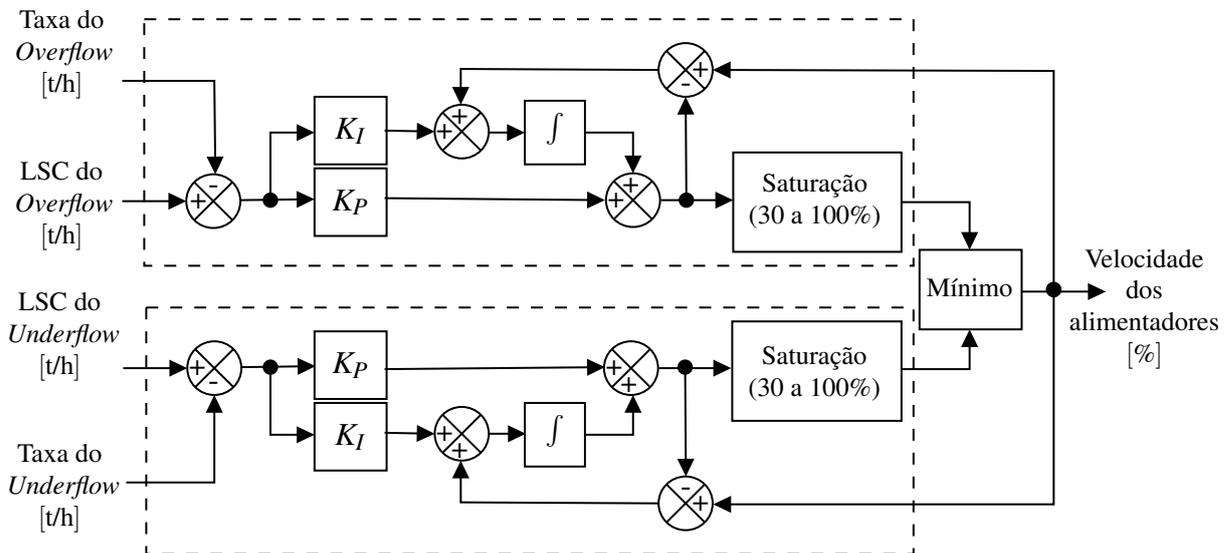


Figura 3.24: EC03 - Fluxograma do controle em *override* utilizado (Controlador PI para o *overflow* na parte superior e para o *underflow* na parte inferior).

Fonte: O autor.

Para a simulação de ambos cenários, definiu-se uma taxa de alimentação fixa de 8200 t/h para os silos do peneiramento secundário. Essa taxa representa a soma do material novo, vindo da pilha de regularização ou diretamente do peneiramento primário/britagem secundária, e do material recirculado, vindo da britagem terciária. As condições iniciais da simulação são todos alimentadores com 30% da velocidade máxima e material já presente em ambas balanças. Como

Tabela 3.11: EC03 - Parâmetros para o controle em *override*.

Parâmetro	<i>Underflow</i>	<i>Overflow</i>
SP [t/h]	5600	2600
K_P	0,0048	0,0127
K_I	1,3535e-04	4,0057e-04

Fonte: O autor.

distúrbio ao sistema, aplicou-se uma variação na granulometria do material da alimentação, sendo que a cada 2,22 horas o F_{80} alterna entre 25,4 mm e 6,2 mm. O F_{80} é o diâmetro no qual 80% do material é passante caso seja colocado em uma peneira de abertura igual ao diâmetro mencionado. Esta porcentagem foi escolhida como representativa para a distribuição granulométrica por ser o valor frequentemente utilizado na literatura para comparação. Fora isso, não há nada de especial com relação a utilizar especificamente 80%. Dessa forma, simulou-se instantes em que o material possui mais e menos finos, representando situações em que a granulometria do material novo se altera ou, ainda, alterações do material recirculado provocadas por mudanças na Abertura na Posição Fechada (APF) ou desgastes no revestimento dos britadores cônicos e, também, por alterações na eficiência do peneiramento, que podem modificar a quantidade de finos direcionados à britagem terciária.

No circuito desenvolvido no software IDEAS[®] e apresentado na Figura 3.25 foram utilizados os seguintes parâmetros para cada equipamento:

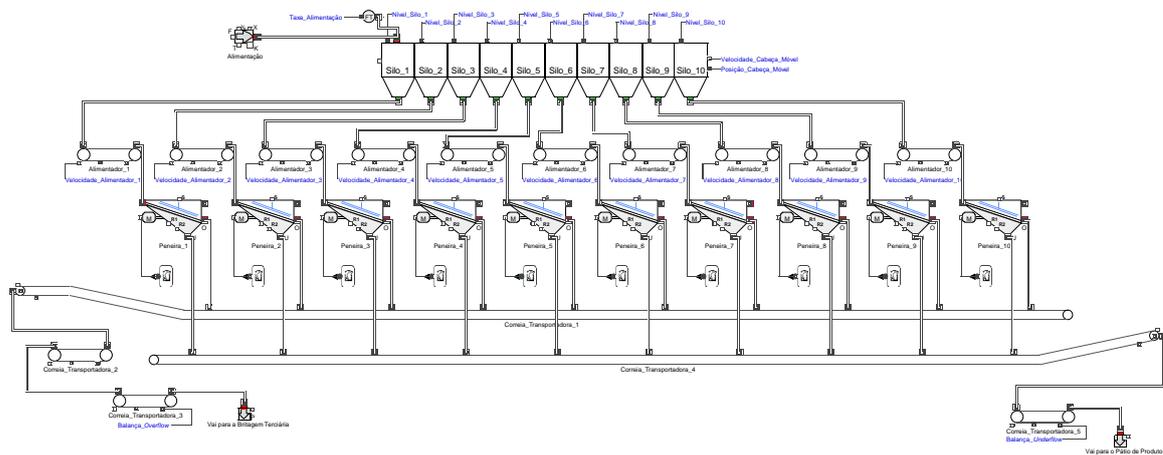


Figura 3.25: EC03 - Circuito de peneiramento secundário de S11D desenvolvido no software IDEAS[®].

Fonte: Captura de tela realizada pelo autor.

- Correia transportadora com cabeça móvel: considera-se que o cabeça móvel tenha curso total de 79,0 m e que a indicação de que ele esteja posicionado sobre determinado silo seja feita da seguinte forma, em que X_{CM} indica a posição atual do cabeça móvel em metros: Silo 1: $0 \leq X_{CM} \leq 4,9$; Silo 2: $4,9 < X_{CM} \leq 13,9$; Silo 3: $13,9 < X_{CM} \leq 22,9$;

Silo 4: $22,9 < X_{CM} \leq 31,9$; Silo 5: $31,9 < X_{CM} \leq 40,9$; Silo 6: $40,9 < X_{CM} \leq 49,9$; Silo 7: $49,9 < X_{CM} \leq 58,9$; Silo 8: $58,9 < X_{CM} \leq 67,9$; Silo 9: $67,9 < X_{CM} \leq 76,9$; Silo 10: $76,9 < X_{CM} \leq 79,0$. Os limites superior e inferior da velocidade de translação são 0,066 m/s e 0,220 m/s, respectivamente, sendo que o valor a ser utilizado é definido pelo mesma lógica utilizada na área de peneiramento primário/britagem secundária e descrita na Subseção 2.2.1 e a descarga de material ocorre em ambos sentidos de translação. Como o foco da simulação se dá a partir da distribuição do material nos silos, essa correia em si pôde ser desconsiderada nesse estudo. Portanto, a simulação se inicia a partir do ponto de descarga desse equipamento.

- Silos: Os 10 silos do peneiramento secundário de S11D são do tipo tanque incompressível, sem comunicação entre si, com capacidade de 500,1 m³ cada e altura de 14,0 m. Na simulação, cada um deles é inicialmente preenchido com material em 50% do nível. Considera-se que a entrada de material ocorre ao nível da altura do silo (14,0 m), com a saída para o alimentador ao nível do fundo do silo (0,0 m). Esses silos possuem geometria irregular, sendo que a relação entre altura do silo e volume acumulado é apresentada na Figura 3.26. Cada silo possui dois medidores de nível do tipo ondas acústicas em posições diferentes, sendo que o maior valor entre eles é considerado o nível do silo utilizado nas lógicas e análises.

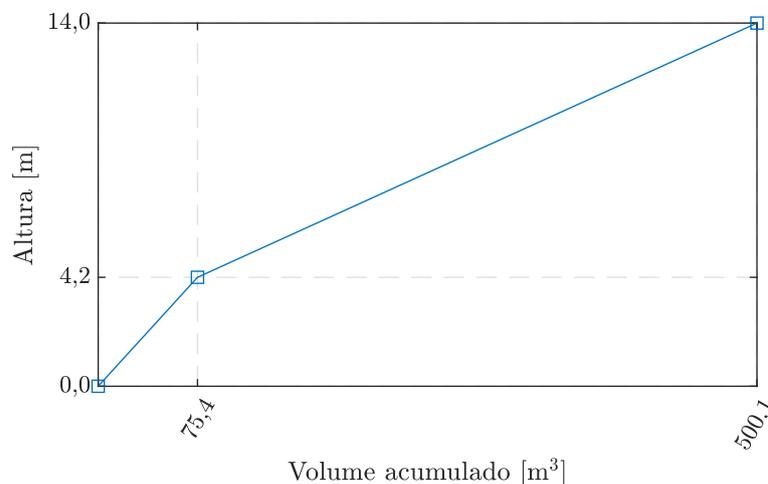


Figura 3.26: EC03 - Relação entre altura e volume acumulado dos silos.

Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

- Peneiras: as 10 peneiras modeladas utilizam os mesmos parâmetros. No simulador, foram utilizadas as Equações (2.18) e (2.19) com os seguintes parâmetros: eficiência de separação da peneira (m) igual a 25,12, tamanho de corte da peneira ($F50$) igual a 14,44 mm e porcentagem de material menor que o tamanho de corte que vai para o *overflow* (R_f) igual a 13,65%.
- Correias transportadoras e alimentadores: as correias transportadoras e os alimentadores

utilizados possuem as especificações apresentadas na Tabela 3.12. As correias transportadoras 1, 2 e 3 são utilizadas para coletar o material do *overflow* das peneiras e as correias transportadoras 4 e 5 coletam do *underflow*. A velocidade dos alimentadores é definida conforme a estratégia de controle utilizada em cada cenário (baseado em regras ou em *override*). No caso das correias transportadoras, elas trabalham em sua velocidade nominal em todo o tempo de simulação. A correia transportadora 3 possui uma balança localizada na posição 156,64 m que é utilizada para medir o fluxo de material transportado no *overflow*, indicando a vazão mássica instantânea em t/h. Da mesma forma, a correia transportadora 5 possui uma balança localizada na posição 67,24 m para medir o fluxo de material do *underflow*.

Tabela 3.12: EC03 - Dados dos alimentadores e correias transportadoras utilizadas na simulação.

Equipamento	Comprimento [m]	Largura da correia [m]	Posição do dispositivo de carregamento (X_{in}) [m]	Posição do dispositivo de descarregamento (X_{out}) [m]	Diâmetro da polia motora [m]	Velocidade nominal [m/s]	Capacidade nominal [t/h]
Alimentadores	9,75	2,20	3,45	9,75	1,25	0,30	1434
Correia transportadora 1	124,00	1,20	1,00	124,00	0,80	3,08	3100
Correia transportadora 2	32,24	1,20	4,88	32,24	0,80	3,08	3100
Correia transportadora 3	556,92	1,20	13,45	556,92	0,80	3,08	3100
Correia transportadora 4	162,80	1,60	1,00	162,80	1,00	4,28	8000
Correia transportadora 5	175,48	1,60	6,00	175,48	1,00	4,28	8000

Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pela equipe de S11D).

Para cada um dos cenários testados, são coletados dados da velocidade dos alimentadores e das taxas de material nas correias do *underflow* e do *overflow*. Com estes dados, é realizada uma comparação entre cenários, considerando a variação da granulometria do material de entrada e buscando-se a estratégia de controle que apresente a melhor combinação de resultados.

3.7.2. Resultados e Discussão

Como mencionado no contexto, o que se busca na indústria mineral é aproveitar ao máximo a capacidade de seus equipamentos. Diante disso, essa pesquisa buscou comparar o método de controle utilizado atualmente na usina de S11D com uma nova proposta, aplicando as duas estratégias às mesmas condições. As Figuras 3.27a e 3.27b ilustram o comportamento da taxa de material nas correias do *underflow* e do *overflow*, respectivamente. Como esperado, observa-se um comportamento mais suave de ambas as taxas quando aplicado o controle em *override*. Além disso, com o controlador baseado em regras, são poucos os momentos em que

as taxas se aproximam de seus valores máximos, sendo o contrário do que ocorre com o controle em *override*, já que, com esse controlador, uma das duas correias estava com sua taxa acompanhando o valor do LSC praticamente durante toda a simulação. Como os controladores atuam ajustando a velocidade do alimentador, isto é, ajustando a taxa de entrada de material na peneira, uma redução de velocidade devido à restrição de uma das correias implica em redução de taxa em ambas correias. Dessa forma, na situação em que uma das correias está restringida por taxa, a outra pode atingir valores menores que o Limite Inferior de Controle (LIC) utilizado pelo controlador baseado em regras, sem que isso seja considerado falha do controlador. Durante toda a simulação, em que alterações no $F80$ foram utilizadas como distúrbio ao processo, o maior valor de taxa de *overflow* atingido foi de 2729 t/h, o que equivale a uma ultrapassagem de 4,96% do valor da referência definida. Com relação à taxa de *underflow*, o pico máximo foi de 5680 t/h, isto é, uma ultrapassagem de 1,43% de sua referência. Estes valores mostram que o controlador projetado foi capaz de proteger os equipamentos, de forma que os valores de taxa que ultrapassaram a referência são pequenos o suficiente para serem considerados irrelevantes.

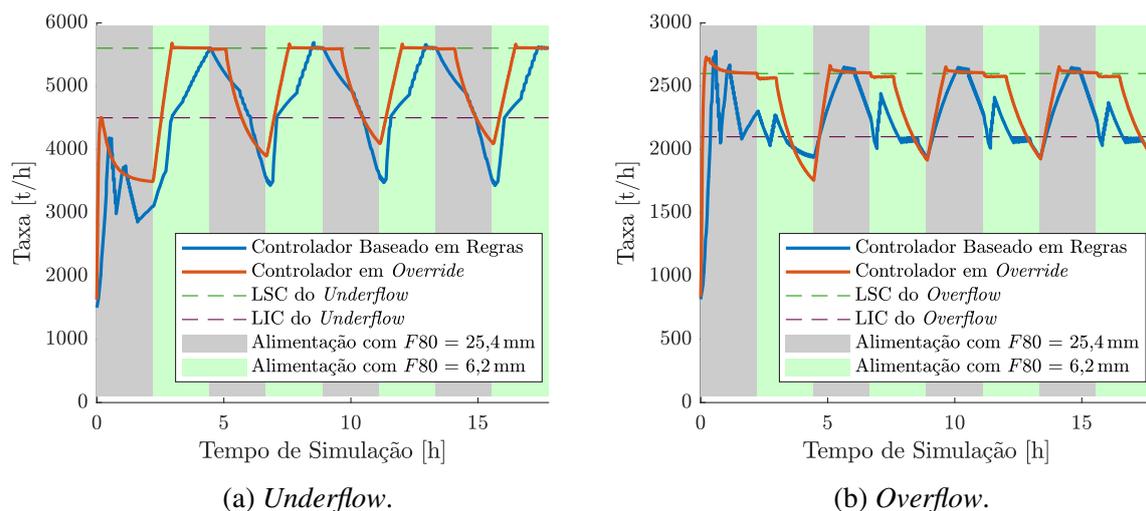


Figura 3.27: EC03 - Comparação de resultados em simulação.

Fonte: O autor.

Em S11D, o *underflow* do peneiramento secundário já é considerado o produto final da usina, não sendo necessário passar por outras etapas de beneficiamento. Buscando comparar, portanto, as taxas de produto final obtidas quando utilizando as duas estratégias de controle, a Figura 3.28 apresenta um diagrama de caixa das taxas do *underflow*. Nota-se que o controle em *override* elevou a mediana da taxa em 10,11% e diminuiu o desvio padrão em 12,62%.

Por fim, na Figura 3.29 é feita a comparação da variável manipulada pelos controladores, isto é, a velocidade dos alimentadores das peneiras. Como esperado, o controle em *override* elevou a velocidade média dos alimentadores, o que resultou no aumento de taxa já apresentado. Nota-se que, nos instantes iniciais, a velocidade apresentou maior aumento em relação ao controle baseado por regras, porém ainda distante de atingir os 100% da velocidade permitida. Outra análise realizada foi o cálculo da Soma dos Incrementos Absolutos da Entrada (*Sum of*

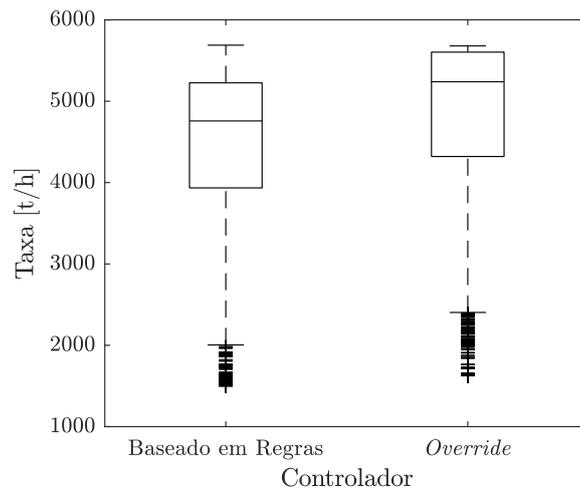


Figura 3.28: EC03 - Diagrama de caixa para as taxas de *underflow*.
Fonte: O autor.

Absolute Input Increments, SAI), que considera a diferença absoluta entre amostras consecutivas da entrada do processo, isto é, a velocidade solicitada para o alimentador. Esse cálculo é feito para cada estratégia de controle, a partir do momento que o sistema entra em regime, da forma mostrada na Equação (3.1), em que $\mathbf{v}(r)$ é a amostra r do vetor de velocidade linear da correia \mathbf{v} do alimentador e T o número total de amostras.

$$\text{SAI} = \sum_{r=1}^{T-1} |\mathbf{v}(r+1) - \mathbf{v}(r)|. \quad (3.1)$$

Considerando o sistema em regime após seis horas no tempo da simulação, o controlador em *override* apresentou uma SAI com valor 6,1% menor que a estratégia baseada em regras. Esse indicador fornece um comparativo sobre qual estratégia causa mudanças mais e menos abruptas no sinal de entrada do processo (MAESTRE *et al.*, 2015) e, portanto, mostra que o controlador em *override* leva a um comportamento mais suave da velocidade do alimentador, reduzindo as ocorrências de situações que poderiam gerar desgastes e falhas no equipamento.

Aplicação real em S11D

A partir dos resultados satisfatórios encontrados nas simulações, foi realizada a troca do controlador para a taxa de *overflow* da planta real de S11D. Na mesma época, foram realizadas também alterações em restrições relacionadas a taxas de saída da usina, nível da área de britagem terciária e taxa de carga circulante. No sistema real é levado em conta as restrições por potência de equipamentos, capacidades dos circuitos anteriores e posteriores ao peneiramento secundário, bem como taxas de referência definidas pelos operadores. Dessa forma, a velocidade dos alimentadores não é definida somente pelo controlador de taxa de *overflow* e, portanto, é esperado que a taxa medida apresente variação considerável e mantenha certa distância de seu

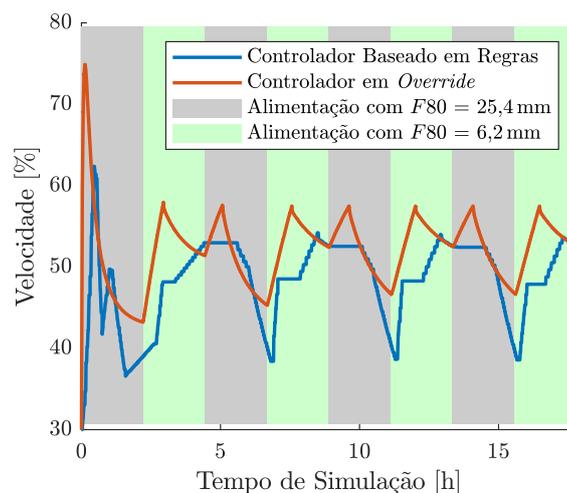


Figura 3.29: EC03 - Comparação de resultados de velocidades dos alimentadores.
 Fonte: O autor.

valor de LSC, ao contrário do que ocorreu nas simulações. Outro ponto a se considerar é que, durante os testes reais, a granulometria do material sofre alterações com maior frequência que a simulada.

A Figura 3.30 apresenta a taxa média diária de material produzido na Usina 1 antes (entre 01/01/2020 e 12/05/2020) e depois (entre 13/05/2020 e 31/10/2020) das alterações realizadas. As médias diárias mais baixas no gráfico estão relacionadas à paradas da usina para manutenção e paradas por estratégia operacional. Comparando os períodos, é possível ver um aumento de aproximadamente 22,2% na média da taxa de material e uma redução de 12,0% no desvio padrão, que apresentou o valor de 817,1 t/h após a aplicação da nova estratégia de controle.

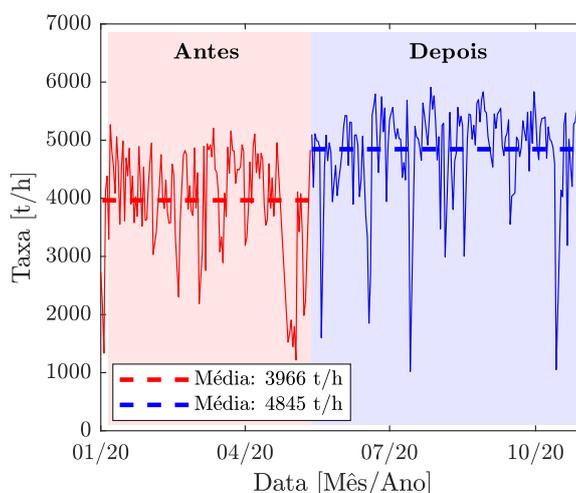


Figura 3.30: EC03 - Produção real na Usina 1 de S11D.
 Fonte: O autor.

Em S11D existem três circuitos de peneiramento secundário e britagem terciária com as mesmas características. Os três conjuntos recebem material de um mesmo circuito de peneiramento primário e britagem secundária e, dessa forma, qualquer variação nas características do material de entrada é sentida pelos três conjuntos ao mesmo tempo. Inicialmente, a troca do controlador foi realizada apenas na Usina 1, permitindo comparar com as taxas medidas nas Usinas 2 e 3 e verificar os efeitos dessa troca. A Figura 3.31 apresenta a taxa nas Usinas 1, 2 e 3 para o período entre 13/05/2020 e 01/06/2020, isto é, período após as alterações realizadas na Usina 1 e ainda com o controlador baseado em regras nas Usinas 2 e 3. Nota-se que a Usina 1, com a aplicação do controle em *override*, produziu mais que as demais usinas na maior parte dos dias analisados, sendo que as taxas médias do período analisado das Usinas 1, 2 e 3 foram, respectivamente, 4493 t/h, 4203 t/h e 3871 t/h.

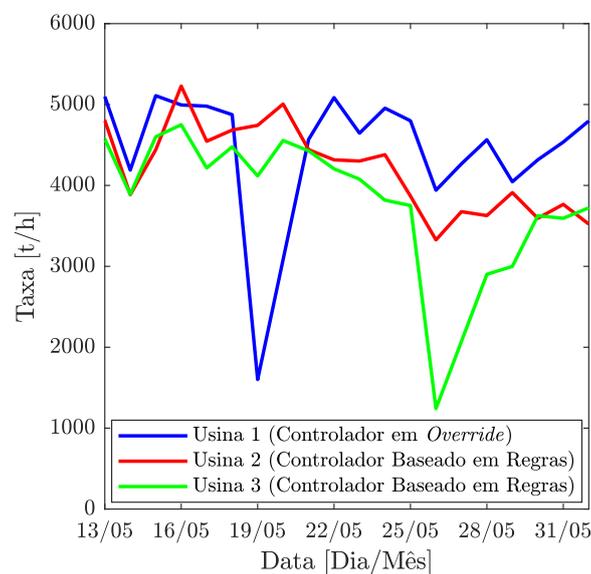
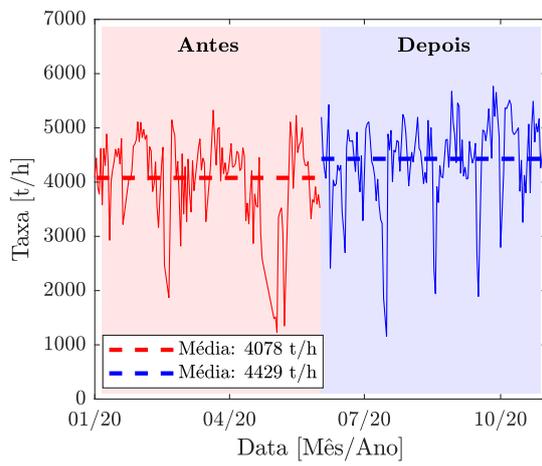
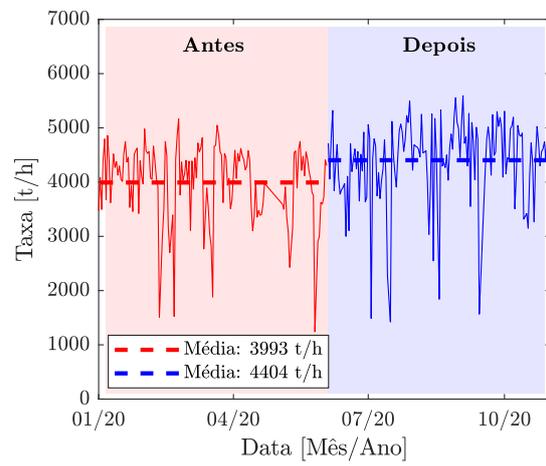


Figura 3.31: EC03 - Comparação de produção nas três usinas de S11D.
Fonte: O autor.

Com os resultados satisfatórios na aplicação real da Usina 1, as alterações foram replicadas dias depois nas Usinas 2 e 3. Os resultados obtidos foram um aumento de 8,6% na média produzida na Usina 2 e aumento de 10,3% para a Usina 3.



(a) Usina 2.



(b) Usina 3.

Figura 3.32: EC03 - Produção real nas Usinas 2 e 3 de S11D.

Fonte: O autor.

4. Calibração de modelos de britadores cônicos

Nesse capítulo é apresentado o trabalho desenvolvido com o objetivo de otimizar o processo de calibração de modelos de britadores cônicos. As seções são divididas de forma a apresentar o contexto, seguido da formulação do problema, revisão bibliográfica e metodologia. As definições de cenários e parâmetros utilizados, além dos resultados e discussões, são apresentados nas seções seguintes.

4.1. Contexto

Modelagem e simulação de processos possuem importância considerável na indústria de processamento mineral. Modelos dinâmicos acurados de uma planta de processamento mineral são úteis no desenvolvimento de sistemas de controle, dimensionamento de equipamentos e treinamento de operadores (NAPIER-MUNN & LYNCH, 1992). Atualmente, com a introdução do conceito de gêmeos digitais, a simulação de processos pode ser ainda mais relevante por poder ser utilizada para encontrar as condições ótimas de operação de um processo, prever a vida remanescente de um equipamento ou o momento de ocorrência de suas falhas (QI & TAO, 2018). Entre os diferentes tipos de equipamentos que compreendem uma planta de processamento mineral, britadores cônicos possuem papel importante na cominuição do minério.

Várias abordagens para modelagem de britadores cônicos estão disponíveis na literatura. Whiten (1972) utiliza balanço de massa e matrizes de quebra e classificação para modelar um circuito de britagem. O modelo de Whiten foi estendido por Lynch (1977) para incluir a predição da corrente elétrica do motor do britador. Equações adicionais para a função de quebra das partículas são apresentadas por Whiten *et al.* (1979), mostrando modelos alternativos para validação dos dados de britagem de diferentes minas. Andersen (1988) amplia o modelo de função de classificação de Whiten e inclui características do revestimento do manto do britador e o valor de t_{10} (porcentagem de produto passante por uma peneira com o tamanho de abertura igual a um décimo do tamanho da partícula original) para prever a quebra. No modelo apresentado por Evertsson (1999), a taxa de compressão, que é um parâmetro calculado baseando-se nos dados da geometria do britador cônico, auxilia na determinação das matrizes de quebra e classificação.

Nos trabalhos citados até agora, o britador cônico é tratado como um equipamento que possui uma única seção de quebra e classificação. Herbst e Oblad (1985) propõem uma abordagem diferente, na qual a câmara do britador é dividida em várias seções com funções de quebra e classificação específicas para cada uma delas. De maneira similar, Atta *et al.* (2014) usam diferentes parâmetros de quebra e classificação para cada seção e, mais tarde, esses autores também introduzem no modelo a predição do consumo de corrente e potência dos motores dos britadores (ATTA *et al.*, 2019). Tentativas de modelagem ainda mais detalhadas consistem em usar modelos baseados em Método dos Elementos Discretos (*Discrete Element Method*, DEM).

Aproveitando as vantagens do aumento do poder computacional com o passar dos anos, essa técnica numérica também passou a ser utilizada para modelar o comportamento dinâmico dos britadores cônicos (CLEARY *et al.*, 2017; QUIST & EVERTSSON, 2016). Outras estratégias de modelagem de britadores cônicos podem ser encontradas na revisão feita por Yamashita *et al.* (2021), que apresenta trabalhos desenvolvidos para pedreiras e indústrias de processamento mineral.

De uma perspectiva prática, o modelo do britador cônico proposto por Whiten (1972) fornece uma solução de compromisso apropriada entre a representabilidade e a simplicidade (SBÁRBARO & DEL VILLAR, 2010). Modelos mais complexos requerem mais informações sobre a geometria dos britadores e os cálculos subsequentes são demorados (HULTHÉN, 2010). Pesquisas no desenvolvimento de controle avançado (KARELOVIC *et al.*, 2016), aplicações de inteligência artificial (SANTOS *et al.*, 2020) e comparação de cenários para otimização (BHADANI *et al.*, 2018) têm confiado no modelo de Whiten. Além disso, as representações de britadores cônicos em vários simuladores comerciais, como IDEAS[®] (Andritz Automation), Mimic[®] (Emerson) e DynSim[®] (Aveva), são baseadas no modelo de Whiten. Tais exemplos de software de simulação dinâmica são bastante utilizados para aplicações de gêmeos digitais, projeto de sistemas de controle, treinamento de operadores e avaliação de fluxogramas do processo.

A seleção do modelo é apenas o primeiro passo para obter uma simulação confiável do comportamento de um processo. O segundo passo consiste na calibração do modelo para seus fins específicos (modelagem de uma determinada planta, de cenários operacionais ou de conjuntos de dados). Normalmente, os parâmetros da função de quebra são calibrados usando resultados de testes de laboratório, sendo essa uma tarefa demorada (KING, 2001). Algumas abordagens alternativas de calibração incluem tentativa e erro, inferência estatística e alguma estratégia de otimização adequada (RICHTER *et al.*, 2020). Dentre essas alternativas, a otimização se destaca por produzir soluções quase ótimas em um período de tempo viável para aplicações práticas e por oferecer uma estrutura adequada e replicável (KARR & YEAGER, 1995; SEPPÄLÄ *et al.*, 2016).

As vantagens da calibração de modelos com base em técnicas de otimização têm sido provadas na literatura (KARR & YEAGER, 1995; SEPPÄLÄ *et al.*, 2016). Em 1984, Klimpel e Austin declararam sua preferência por um modelo condensado de função de quebra, argumentando que resolver o problema de calibração com um modelo não condensado exigiria muito poder computacional (KLIMPEL & AUSTIN, 1984). Ao longo dos anos, no entanto, avanços nas capacidades computacionais podem ter tornado esse argumento obsoleto e, dessa forma, permitir mais graus de liberdade no problema de calibração pode resultar em modelos de britadores mais precisos e acurados. As pesquisas feitas para essa dissertação encontraram trabalhos de calibração do modelo de Whiten com a data mais recente na década de 1990. Essa situação pode indicar que, ou a comunidade científica está satisfeita com as estratégias de calibração disponíveis para o modelo de britador cônico de Whiten, ou nenhum esforço tem sido feito

para melhorar a acurácia da calibração. Essa dissertação se baseia na segunda possibilidade e, portanto, propõe uma nova estratégia de calibração para o modelo de britador cônico.

4.2. Formulação do Problema

Nessa dissertação, o problema de calibração para o modelo de Whiten de britadores cônicos é formulado como um problema de otimização. A Soma do Quadrado do Erro (*Sum of the Squared Error*, SSE) entre os valores medidos e estimados da Distribuição do Tamanho das Partículas (*Particle Size Distribution*, PSD) acumulada é minimizada usando um algoritmo de Programação Quadrática Sequencial (*Sequential Quadratic Programming*, SQP). Ao invés de utilizar a função que define cada elemento da matriz de quebra condensada e realizar uma calibração indireta de seus elementos, como proposto por Whiten (1972), o modelo não condensado — ou de matriz completa —, no qual todos os elementos da matriz de quebra são diretamente calibrados, é usado. Isso adiciona mais graus de liberdade para o problema de calibração. Dados operacionais das minas de minério de ferro S11D e Serra Leste, pertencentes à Vale, foram coletados para calibração e validação do modelo. Somente dados que são normalmente coletados durante a operação (PSD, Abertura na Posição Fechada (*Closed Side Setting*, CSS) e taxa de produção) são necessários para a estratégia de calibração; dados adicionais de laboratório, os quais podem ser difíceis de serem obtidos (ANTICOI *et al.*, 2018; YIANATOS *et al.*, 2020), não são necessários.

As Equações (2.14) a (2.13), apresentadas na Subseção 2.1.4, expressam a matriz de quebra em uma forma condensada dos parâmetros, já que apenas três parâmetros definem todos os elementos da matriz. Klimpel e Austin (1984) usam essa função de quebra condensada para reduzir o número de parâmetros de calibração. Esses autores argumentam que o problema de calibração (formulado como um problema de otimização) pode ser resolvido de forma mais eficiente com menos parâmetros de calibração. De forma similar, Leite (1990) argumenta que a forma condensada da função de quebra é mais tratável que a forma não condensada e que os parâmetros de calibração têm maior significado físico. Na função condensada, Φ denota a fração de partículas resultantes na fração mais fina, δ descreve as partículas maiores produzidas pela tensão de tração e σ representa as partículas menores produzidas pela intensa tensão de compressão (KING, 2001). Apesar disso, nessa dissertação, optou-se por aumentar o número de graus de liberdade na função de quebra, ao custo de complexidade adicional. Ao invés de calibrar somente os parâmetros Φ , δ e σ , foi proposto calibrar os elementos da parte triangular inferior da matriz de quebra \mathbf{B} , que possui dimensão $n_f \times n_f$, sendo n_f o total de classes nas quais a PSD do fluxo de material da alimentação é dividida, resultando em $n_f(n_f + 1)/2$ parâmetros de calibração. Importante notar que, nesse caso, as restrições definidas na Equação (2.15), sobre a soma dos elementos de cada coluna de \mathbf{B} ser igual a 1, ainda se mantêm.

Busca-se demonstrar nessa dissertação que, aproveitando os benefícios das capacidades computacionais atuais, realizar a calibração direta de cada elemento da matriz de quebra, se

opondo ao que foi feito por Klimpel e Austin (1984) e Leite (1990), não somente é computacionalmente possível, mas também resulta em um modelo de britador cônico mais acurado e preciso. Além disso, modelos de britadores cônicos baseados na calibração dos elementos da parte triangular inferior da matriz de quebra, apesar de perder os significados físicos dos parâmetros, são alternativas válidas para projeto de circuitos e aplicações de controle de processos (LEITE, 1990).

4.3. Revisão bibliográfica

Essa seção traz alguns dos estudos encontrados na literatura de processamento de minerais sobre calibração baseada em otimização. Especificamente, os estudos apresentados aqui trazem modelos empíricos ou de princípios básicos da calibração de equipamentos de britagem, moagem e flotação, usando estratégias de otimização.

Um modelo de moinho autógeno/semi-autógeno foi calibrado por Perez *et al.* (2019). O processo de calibração foi formulado como um problema de otimização no qual um método de busca global foi usado para minimizar a diferença entre os valores preditos e medidos da PSD. As respostas estáticas foram validadas usando dados industriais e mostraram valores acurados para variáveis chave (por exemplo, distribuições de tamanho, pressão no hidrociclone, carga circulante, nível de enchimento do moinho e potência drenada pelo moinho). Esnault *et al.* (2015) desenvolveram e calibraram um modelo de balanço populacional para a predição do tamanho das partículas em um moinho de compressão. Os resultados mostraram que, por um lado, o modelo requereu conjuntos de dados extensos coletados sobre diferentes condições de operação para uma calibração adequada. Por outro lado, um vez calibrado, o modelo ofereceu acurácia suficiente para aplicações relacionadas à otimização do projeto de moinhos com geometria complexa, tais como moinhos verticais e moinhos horizontais de rolos (Horomill®). Klimpel e Austin (1984) propuseram a calibração de taxas específicas de quebra e funções de distribuição de quebra em circuitos de moagem usando parâmetros condensados. De acordo com os autores, calibrar todos os parâmetros da equação era computacionalmente dispendioso e não resultava em parâmetros com significado físico, os quais poderiam indicar que o problema de calibração era subdeterminado.

Britadores de Rolos de Alta Pressão (*High Pressure Grinding Rolls*, HPGRs) são equipamentos utilizados em alguns circuitos de moagem. Torres e Casali (2009) estimam os parâmetros de um HPGR usando o algoritmo do gradiente descendente e Hasanzadeh e Farzanegan (2011) usam um algoritmo genético. Daniel e Morrell (2004) estudam a modelagem, calibração e expansão do processo com HPGR. Na etapa de calibração, dados em escala de laboratório e de uma planta piloto foram coletados e utilizados para obter os parâmetros do modelo da PSD, taxa de produção e potência drenada. O problema de calibração foi formulado como um problema de otimização de mínimos quadrados. O procedimento de expansão foi realizado baseando-se em uma certa propriedade mecânica do HPGR (a relação entre a lacuna entre rolos e o seu

diâmetro), o qual foi assumido permanecer constante em qualquer escala de operação. De forma similar, Campos *et al.* (2019a) também formularam o problema de calibração como um problema de otimização de mínimos quadrados. A função objetivo foi projetada para considerar o logaritmo dos valores medidos e estimados da PSD acumulada e o problema resultante foi resolvido usando o algoritmo de Nelder-Mead da função *fminsearch* do software MathWorks MATLAB®. Anticoi *et al.* (2018) analisaram a influência do tipo de material nos parâmetros da função de quebra em um circuito de moagem. Os parâmetros foram calibrados utilizando dados de ensaios de resistência à compressão simples e ensaios de prensa e pistão; os parâmetros ótimos foram obtidos minimizando a raiz do valor quadrático médio do erro entre os valores medidos e calculados. Resultados ambíguos levaram os autores a concluir que algoritmos numéricos podem não ser a melhor opção para a calibração no cenário atual. De forma similar ao estudo anterior, Anticoi *et al.* (2019) também estudaram a influência das condições de operação de um HPGR em escala piloto nos parâmetros da função de quebra.

A calibração de modelos de processos de flotação tem se mostrado ser uma tarefa complexa. Seppälä *et al.* (2016) desenvolveram e calibraram um modelo dinâmico de um circuito de flotação baseado em dados em escala de planta piloto. A calibração do modelo foi realizada por tentativa e erro. Os resultados apresentados indicaram que o modelo permitiu uma melhor compreensão dos efeitos de diferentes materiais de alimentação e níveis de pH na concentração do mineral no produto. No entanto, os autores notaram que o processo de calibração deveria ser realizado utilizando rotinas de otimização para aumentar a adaptabilidade do modelo a diferentes plantas e para garantir que os parâmetros calculados fossem ótimos. Yianatos *et al.* (2020) desenvolveram um modelo para processos de flotação baseando-se em dados industriais de grandes células de flotação. Nesse modelo, os efeitos do tipo de mineral e das condições de operação são tratados independentemente. A calibração do modelo requereu uma extensa coleta de dados de testes de laboratório e de operação da planta. Karr e Yeager (1995) exploraram a aplicação de um algoritmo genético para a calibração do modelo de flotação por coluna. Os autores adaptaram a função de avaliação do algoritmo para atender ao problema de calibração em questão, demonstrando a flexibilidade da técnica. Foi concluído que o método de calibração baseado em otimização heurística é mais rápido que, e tão acurado quanto, métodos baseados em estatística e em tentativa e erro.

Nota-se que a apresentação de tentativas de calibração de modelos de britadores cônicos são bastante escassas na literatura. Whiten (1972) propôs solucionar o problema de calibração de modelos de britador cônico e de peneira vibratória usando método dos mínimos quadrados não linear. Dados industriais das minas Mount Isa Mines e North Broken Hill Consolidated, ambas na Austrália, foram usados para a calibração. Os autores apresentaram um erro médio de 0,5% com desvio padrão de 3,0% entre os valores de PSD preditos e medidos. Leite (1990) resolveu a tarefa de calibração de modelo de processos com britadores cônicos e peneiras vibratórias ajustando os dados preditos às informações de britadores cônicos presentes na literatura. O autor não divulgou outros detalhes sobre o método de calibração. King (1990) calibrou

o modelo de Whiten (1972) como implementado em software comercial de simulação modular. Os valores iniciais para os parâmetros foram baseados de recomendações da literatura e o melhor ajuste foi encontrado por tentativa e erro. Os valores de PSD calculados foram comparados com os dados operacionais da mina Rössing Uranium (Namíbia) e nenhuma informação quantitativa foi dada; no entanto, os autores afirmaram que o ajuste foi bom. O modelo de britador calibrado, junto com o modelo de peneira calibrado, foi usado em software comercial para simular os circuitos de britagem secundária, terciária e quaternária da mina Rössing Uranium. As referências mais recentes relatam a calibração de modelos de balanço populacional (CHEHREGHANI *et al.*, 2017) e de partículas cimentadas (QUIST & EVERTSSON, 2016) usando técnicas de otimização. Tais modelos são abordagens concorrentes para a modelagem de britadores cônicos baseada em DEM. Devido à sua grande demanda computacional, que os torna inviáveis para uso em aplicações de controle de processos, os modelos baseados em DEM estão além do escopo dessa dissertação.

4.4. Metodologia

Para responder a pergunta da pesquisa sobre a calibração de parâmetros de modelos de britadores cônicos, a metodologia utilizada é a pesquisa experimental baseada em estudos de casos de duas unidades de operação da Vale. Os experimentos são realizados por meio da formulação de um modelo de programação não linear. Além disso, duas variantes do problema de calibração foram definidas: *i*) o problema com a Estratégia de Calibração Direta (ECD) da matriz de quebra, calibrando diretamente cada elemento da matriz e *ii*) o problema com a Estratégia de Calibração Indireta (ECI) da matriz de quebra, calibrando os parâmetros da função que determina cada elemento da matriz. ECD é a estratégia proposta nessa dissertação, enquanto que ECI é a estratégia estabelecida na literatura. Os problemas de otimização resultantes são resolvidos usando o método de SQP (BOGGS & TOLLE, 1995), o qual demonstra ótimo desempenho na resolução de problemas de otimização não linear (SIVASUBRAMANI & SWARUP, 2011).

O modelo de britador cônico apresentado na subseção 2.1.4 é uma função de vários parâmetros que devem ser calibrados. Com a realização da calibração, o que se deseja é obter um modelo que possa prever a PSD do produto de um britador cônico, permitindo assim a implementação de algoritmos de controle de processo que dependem de um modelo da planta.

A partir daqui, as seguintes notações são utilizadas:

- $DS = \{1, \dots, n_d\}$: grupo de n_d conjuntos de dados;
- $CL = \{1, \dots, n_f\}$: grupo de n_f classes usadas para descrever a PSD do material;
- CSS_l : Abertura na Posição Fechada (CSS; mm) do britador cônico para o conjunto de dados l , $l = 1, \dots, n_d$;

- TPH_l : taxa de produção (material seco; t/h) para o conjunto de dados $l, l = 1, \dots, n_d$;
- $F80_l$: tamanho (mm) em que 80% do material da alimentação é passante para o conjunto de dados $l, l = 1, \dots, n_d$;
- $LLEN_l$: comprimento da face do revestimento do manto (mm) para o conjunto de dados $l, l = 1, \dots, n_d$;
- LHR_l : idade do revestimento (horas) para o conjunto de dados $l, l = 1, \dots, n_d$;
- ET_l : amplitude dos golpes excêntricos (mm) para o conjunto de dados $l, l = 1, \dots, n_d$;
- θ : vetor das variáveis de decisão;
- LB : limite inferior das variáveis de decisão;
- UB : limite superior das variáveis de decisão;
- $\hat{P}_{i,l}(\theta), P_{i,l}$: PSD do produto predito e medido, respectivamente, para $i = 1, \dots, n_f$ e $l = 1, \dots, n_d$.

O problema de otimização utilizando a ECD é formulado como segue:

$$\min_{\theta_1} \sum_{l \in DS} \sum_{i \in CL} (\hat{P}_{i,l}(\theta_1) - P_{i,l})^2 \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in CL} b_{ij} = 1, \quad \forall i \in CL, \quad (4.2)$$

$$0,5CSS_l \leq (\alpha_0 + \alpha_1 CSS_l - \alpha_2 TPH_l + \alpha_3 CSS_l + \alpha_4 LLEN_l) \leq 0,95CSS_l, \quad \forall l \in DS, \quad (4.3)$$

$$1,7CSS_l \leq (\beta_0 + \beta_1 CSS_l + \beta_2 TPH_l + \beta_3 F80_l - \beta_4 LHR_l + \beta_5 ET_l) \leq 3,5CSS_l, \quad \forall l \in DS, \quad (4.4)$$

$$LB \leq \theta_1 \leq UB. \quad (4.5)$$

As variáveis de decisão para o problema usando a ECD são: $\alpha_0, \dots, \alpha_4$, usadas no cálculo do parâmetro K_1 da função de classificação; β_0, \dots, β_5 , usadas no cálculo do parâmetro K_2 da função de classificação; γ_0 , utilizada no cálculo do parâmetro K_3 para a função de classificação; e b_{ij} , a qual representa a porcentagem de partículas que quebram dentro do britador cônico e mudam da classe de partículas $j \in CL$ para a classe de partículas $i \in CL$. O vetor de variáveis de decisão θ resultante é $\theta_1 = \{\alpha_0, \dots, \alpha_4 \cup \beta_0, \dots, \beta_5 \cup \gamma_0 \cup b_{ij}\}$. O objetivo, como mostrado na Equação (4.1), é minimizar a SSE entre a PSD medida do produto (P) e a calculada usando o modelo do britador cônico (\hat{P}). As restrições na Equação (4.2) garantem que a soma dos valores de cada coluna de \mathbf{B} seja igual a um. As restrições das Equações (4.3) e (4.4) definem limites para K_1 e K_2 baseando-se em recomendações empíricas (KING, 2001). Por fim, a restrição da Equação (4.5) define limites em θ_1 .

O problema de otimização utilizando a ECI corresponde à estratégia de calibração estabelecida na literatura, como visto em Klimpel e Austin (1984) e Leite (1990). Na ECI, os parâmetros da função de quebra que aparecem na Equação (2.13) são calibrados. Portanto, as variáveis de decisão b_{ij} são removidas e três novas variáveis de decisão são adicionadas: Φ , δ e σ . A função objetivo é projetada para minimizar a SSE do novo vetor θ , representado por $\theta_2 = \{\alpha_0, \dots, \alpha_4 \cup \beta_0, \dots, \beta_5 \cup \gamma_0 \cup \Phi \cup \delta \cup \sigma\}$, que substitui θ_1 na Equação 4.1. As restrições são similares àsquelas do problema usando a ECD, exceto na restrição da Equação (4.5), em que θ_1 é alterado para θ_2 .

4.5. Definições de cenários e parâmetros utilizados

Essa seção apresenta os conjuntos de dados, parâmetros a serem calibrados e cenários utilizados na calibração proposta para o modelo de britador cônico de Whiten. Os estudos de caso consideram sete conjuntos de dados operacionais da Vale. A taxa de produção do britador cônico e a PSD do fluxo de alimentação e produto foram coletados para três diferentes CSSs na mina de minério de ferro de Serra Leste (conjunto de dados 1 a 3); a PSD do fluxo de produto e alimentação também foram coletadas em um CSS de 28 mm para quatro diferentes valores de $F80$ da mina de minério de ferro de S11D (conjunto de dados 4 a 7). A Tabela 4.1 resume as informações dos conjuntos de dados usados para a calibração dos modelos de britadores cônicos.

Tabela 4.1: Resumo dos parâmetros operacionais para cada conjunto de dados.

Mina de Origem	Modelo de Britador	Conjunto de Dados – l	CSS (mm)	TPH (t/h)	F80 (mm)
Serra Leste	Metso HP400	1	35	883	102,36
		2	38	986	102,36
		3	41	998	102,36
S11D	Sandvik CH660	4	28	368	45,35
		5	28	368	73,03
		6	28	368	30,89
		7	28	368	27,79

Fonte: O autor (com base em dados disponibilizados pelas equipes de Serra Leste e S11D).

Devido à limitação da disponibilidade de dados obtidos durante a operação da planta e da falta de informação relacionada às condições operacionais, alguns dos parâmetros da função de classificação da Equação (2.9) foram desconsiderados durante o procedimento de calibração: variáveis $LLEN$, LHR e ET , os quais estão relacionados aos parâmetros α_4 , β_4 e β_5 , respectivamente. Os vetores de variáveis de decisão foram ajustados por consequência.

Para todos os conjuntos de dados, o número de classes no fluxo de material foi determinado em ensaios de laboratório, resultando em $n_f = 22$. Como os conjuntos de dados 1 a 3 e

conjuntos de dados 4 a 7 foram coletados de diferentes britadores e minas, eles foram tratados separadamente nos testes de calibração e validação.

Os problemas usando ECD e ECI foram solucionados com um algoritmo de SQP comercial (*fmincon*, MATLAB®) em um computador com processador de 1,6 GHz e 8 GB de RAM, rodando MATLAB® versão 2019b em um sistema operacional Windows 10 de 64 bits. Os problemas usando ECD e ECI possuem 262 e 12 variáveis de decisão, respectivamente. A diferença significativa entre o número de variáveis se origina dos elementos b_{ij} de \mathbf{B} , os quais correspondem a $n_f(n_f + 1)/2 = 253$ parâmetros. O número máximo de iterações e o número máximo de avaliações da função objetivo pelo algoritmo SQP foram configurados ambos como 10^{10} ; todas as demais configurações foram mantidas em seus valores padrão.

A análise da ECD, como uma estratégia candidata para a calibração de modelos de britadores cônicos baseados em conjuntos de dados industriais, é dividida em quatro cenários. No Cenário 1, os parâmetros do modelo são calibrados individualmente e validados com o mesmo conjunto de dados. No Cenário 2, os parâmetros do modelo são calibrados usando os conjuntos de dados 1, 2 e 3 simultaneamente e validados em um conjunto de dados por vez. Cenários 1 e 2 são básicos, no sentido de que o modelo é calibrado e validado usando o mesmo conjunto de dados. Idealmente, essa situação deveria ser evitada; no entanto, na prática industrial, conjuntos de dados adicionais podem ser escassos. No Cenário 3, os parâmetros do modelo são calibrados usando dois conjuntos de dados (escolhidos entre conjuntos de dados 1-3 ou conjuntos de dados 4-7) e validados em um terceiro conjunto de dados da mesma mina de origem, mas não utilizado na etapa de calibração. O Cenário 4, por outro lado, representa a prática comum de calibrar e validar um modelo em diferentes conjuntos de dados, com um grau de complexidade adicional: os conjuntos de dados são obtidos sob diferentes condições de operação. No Cenário 4, o modelo calibrado no Cenário 2 é usado para prever as curvas da PSD para diferentes valores de CSS.

Em todos os cenários de calibração e validação estudados aqui, os valores iniciais para a ECD (θ'_1) foram definidos baseando-se no trabalho de Napier-Munn *et al.* (1996):

$$\theta'_1 = \left[0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 2,43 \quad 0 \quad 0 \quad 2,3 \quad \mathbb{1}_{1, \frac{n_f(n_f+1)}{2}} \times 0,01 \right],$$

onde $\mathbb{1}_{1, \frac{n_f(n_f+1)}{2}}$ representa um vetor de uns com tamanho igual a $n_f(n_f + 1)/2$. Os valores iniciais para a ECI (θ'_2), quando aplicável, foram definidos baseando-se nos trabalhos de Napier-Munn *et al.* (1996) e King (2001):

$$\theta'_2 = \left[0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 2,43 \quad 0 \quad 0 \quad 2,3 \quad 0,3 \quad 0,5 \quad 4,5 \right].$$

Os limites inferiores e superiores das variáveis de decisão dos problemas de otimização

foram definidos como:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \alpha_a \\ \beta_b \\ \delta \\ \sigma \end{bmatrix} < \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}, \quad (4.6a)$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 10^{-3} \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \gamma_0 \\ b_{ij} \\ \Phi \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4.6b)$$

onde $a, b = 0, \dots, 3$ e $i, j = 1, \dots, n_f$.

4.6. Resultados e Discussão

Essa seção é dividida em duas partes. Primeiro, são apresentadas as comparações entre as estratégias de calibração utilizadas, justificando a proposta da ECD dessa dissertação. Logo após, são apresentados os resultados de calibração e validação utilizando a ECD em alguns cenários.

4.6.1. Comparações entre a ECI e a ECD

A Figura 4.1 traz um exemplo da diferença entre as previsões da PSD do produto obtidas usando a função de quebra apresentada na Equação (2.13) (ECI) e matriz de quebra definida na Equação (2.14) (ECD) para calibração usando o conjunto de dados 1. Os valores de SSE mostram que a diferença é significativa: $SSE = 98,66$ para o modelo calibrado usando a ECI e $SSE = 6,04 \times 10^{-5}$ para o modelo calibrando usando a ECD. Esse resultado demonstra que aumentar o número de graus de liberdade do modelo permite encontrar um melhor ajuste dos dados.

A Tabela 4.2 mostra que a ECD também leva a um ajuste do modelo que resulta em uma predição melhor do que a ECI para a calibração usando dois ou mais conjuntos de dados de Serra Leste e S11D e várias combinações possíveis (investigadas nos Cenários 2 e 3 da próxima subseção). Para os dados de Serra Leste, a média e o desvio padrão da SSE para a ECD foram 6,43 e 10,56, respectivamente, enquanto que a média e o desvio padrão para a ECI foram 267,90 e 250,22, respectivamente. Para os dados de S11D, a média e o desvio padrão da SSE para a ECD foram 124,34 e 236,82, respectivamente, enquanto que a média e o desvio padrão para a ECI foram 409,37 e 444,76, respectivamente. O tempo necessário para solucionar o problema de otimização usando a ECD foi, no caso mais lento, aproximadamente 3 minutos. Embora essa seja uma diferença significativa em comparação com o tempo necessário para a ECI (10 segundos), a magnitude do tempo de processamento para a ECD não é relevante na prática para as aplicações do modelo. Além disso, a calibração pela ECD é muito mais rápida

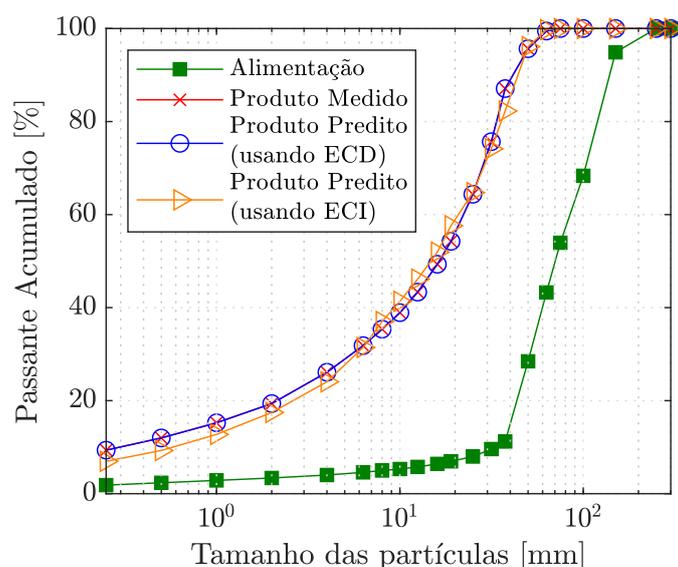


Figura 4.1: Curvas da PSD medida e predita para comparar os efeitos do número de graus de liberdade da função de quebra na acurácia do modelo para o conjunto de dados 1.

Fonte: O autor.

que a calibração por tentativa e erro. Discussões mais completas sobre os valores da SSE da Tabela 4.2 são apresentadas na Subsecção 4.6.2.

Tabela 4.2: Resumo dos valores de SSE e tempos de processamento usando a ECD e a ECI.

Mina de origem	Conjunto(s) de dados usado(s) para calibração	ECD		ECI	
		SSE	Tempo [s]	SSE	Tempo [s]
Serra Leste	1	$6,04 \times 10^{-5}$	20,72	98,66	1,43
	2	$3,01 \times 10^{-6}$	13,32	72,16	2,90
	3	$2,21 \times 10^{-6}$	12,92	76,10	1,53
	1 e 2	22,51	180,39	407,95	1,94
	1 e 3	1,26	79,04	308,75	1,51
	2 e 3	$1,28 \times 10^{-2}$	97,63	155,85	1,60
	1, 2 e 3	21,23	58,07	755,82	3,76
	Média (Desvio Padrão)	6,43 ($\pm 10,56$)	66,01 ($\pm 60,50$)	267,90 ($\pm 250,22$)	2,10 ($\pm 0,89$)
S11D	5 e 7	10,15	30,94	244,83	10,45
	4 e 7	7,67	22,29	258,50	3,23
	4 e 5	$4,94 \times 10^{-2}$	56,52	70,15	2,99
	4, 5, 6 e 7	479,51	42,11	1064,00	2,50
		Média (Desvio Padrão)	124,34 ($\pm 236,82$)	37,96 ($\pm 14,79$)	409,37 ($\pm 444,76$)

Fonte: O autor.

4.6.2. Calibração/Validação usando a ECD

Em todos os cenários, para comparação, são apresentados os resultados possíveis de se obter pela abordagem de tentativa e erro, considerando os valores dos parâmetros recomendados por King (2001), isto é, $K_1 = [0,50 - 0,95]$, $K_2 = [1,7 - 3,5]$, $K_3 = [1 - 3]$, $\Phi = [0,1 - 0,9]$,

$\delta = 0,5$ e $\sigma = 4,5$. Nesse caso, a região verde das imagens ilustra todas as possibilidades de resultados disponíveis.

Cenário 1

Primeiro, conjuntos de dados foram usados individualmente para calibrar o modelo do britador cônico. Esse cenário representa uma condição em que apenas um conjunto de dados está disponível para calibração, sendo essa uma situação que é comum na prática industrial. A Figura 4.2 apresenta as curvas da PSD medidas e previstas para cada conjunto de dados. Sem exceção, os modelos calibrados usando a ECD predizem a curva da PSD com proximidade aos valores medidos. Os valores da SSE para os conjuntos de dados 1, 2 e 3 foram $6,04 \times 10^{-5}$, $3,01 \times 10^{-6}$ e $2,21 \times 10^{-6}$, respectivamente. A Tabela 4.3 mostra os parâmetros calibrados resultantes para cada conjunto de dados, exceto os 253 elementos da matriz da função de quebra, que foram omitidos por praticidade. Os parâmetros do modelo são diferentes entre os conjuntos de dados devido às diferenças no CSS e na taxa de produção de cada um deles.

Tabela 4.3: Parâmetros calibrados no Cenário 1.

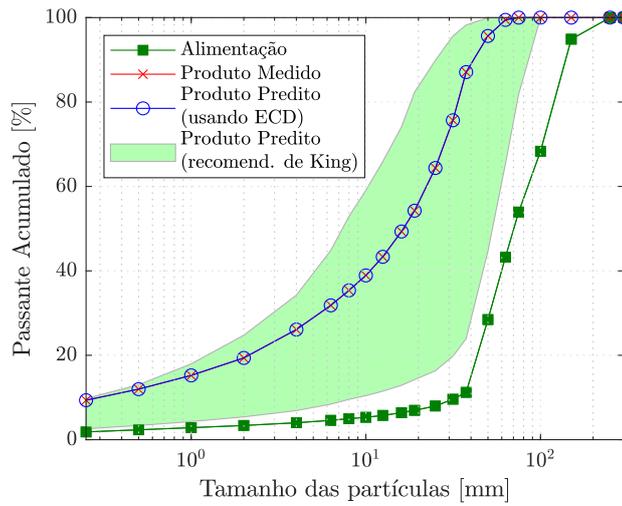
Conjunto de dados	α_0	α_1	α_2	α_3	β_0	β_1	β_2	β_3	γ_0
1	0	0,933	0,007	0	0,005	1,211	0,036	0,031	1,776
2	0	0,855	0,012	0	0,003	0,883	0,081	0,089	1,495
3	0,001	0,959	0,019	0	0,011	2,905	0	0,033	1,256

Fonte: O autor.

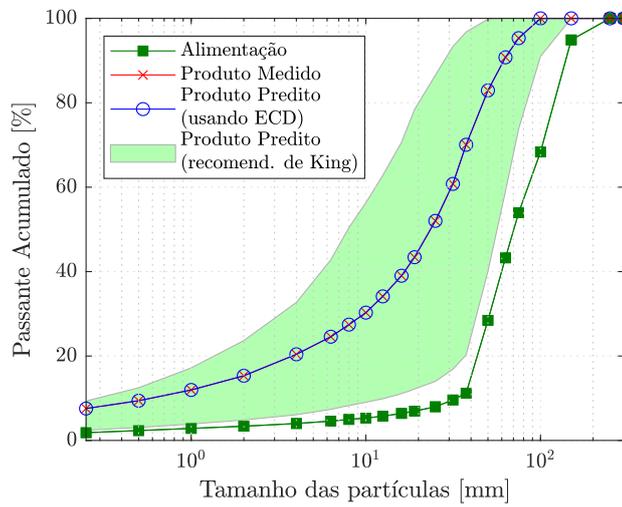
Napier-Munn *et al.* (1996) afirmam que K_1 e K_2 frequentemente possuem fraca dependência no $F80$ e essa afirmativa justifica o fato do parâmetro α_3 do modelo ser 0 para todos os conjuntos de dados. Além disso, os resultados indicam que, para um CSS maior, os elementos diagonais da matriz da função de classificação são mais possíveis de serem 0 e menos possíveis de serem 1, o que é consistente com as observações práticas. Os valores pequenos de SSE observados em todos os casos indicam que, nesse cenário, o modelo de britados cônico baseado na ECD pode replicar de forma confiável o comportamento do equipamento da planta de Serra Leste para as condições operacionais dadas. O próximo cenário investiga como o uso de todos os três conjuntos de dados na calibração afeta as previsões do modelo.

Cenário 2

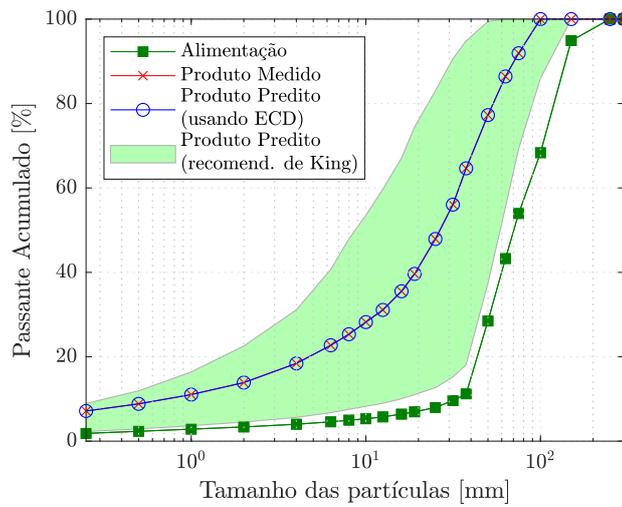
Aqui, o procedimento de calibração considera simultaneamente todos os conjuntos de dados de uma única mina de origem. Para Serra Leste (conjuntos de dados 1 a 3), a Figura 4.3 mostra que existe quase nenhuma diferença entre as curvas previstas e medidas da PSD do produto, mesmo quando o modelo é ajustado para conjuntos de dados com diferentes CSSs. Os valores da SSE para a validação usando os conjuntos de dados 1, 2 e 3, individualmente, são 13,40; 5,49; e 2,49, respectivamente. Para S11D (conjuntos de dados 4 a 7), a Figura 4.4,



(a) Modelo calibrado com o conjunto de dados 1.



(b) Modelo calibrado com o conjunto de dados 2.



(c) Modelo calibrado com o conjunto de dados 3.

Figura 4.2: Curvas medidas e preditas para a PSD no Cenário 1. O mesmo conjunto de dados da calibração foi utilizado na validação.

Fonte: O autor.

de forma similar, mostra que a PSD predita para o produto é próxima à PSD medida, apesar dos valores de $F80$ serem diferentes em cada conjunto de dados utilizado. Os valores da SSE para validação usando os conjuntos de dados 4, 5, 6 e 7, individualmente, são 60,24; 7,17; 273,80; e 138,29, respectivamente.

A Tabela 4.4 resume os valores encontrados para os parâmetros calibrados. Para Serra Leste (linha 1), os valores não nulos são aqueles relacionados à taxa de produção e CSS, indicando que o modelo calibrado é capaz de levar em consideração os diferentes valores de CSS e taxa de produção dos conjuntos de dados da calibração. Para S11D (linha 2), observa-se um valor não nulo para α_3 , que é o parâmetro relacionado ao $F80$. Isso indica que o modelo calibrado é também capaz de levar em consideração os diferentes valores de $F80$ entre os conjuntos de dados.

Tabela 4.4: Parâmetros calibrados no Cenário 2.

Mina de Origem	α_0	α_1	α_2	α_3	β_0	β_1	β_2	β_3	γ_0
Serra Leste (1 a 3)	0	0,905	0	0	0	0,096	0,095	0	3,000
S11D (4 a 7)	0,155	0,441	0	0,053	0,047	1,698	0	0	3,000

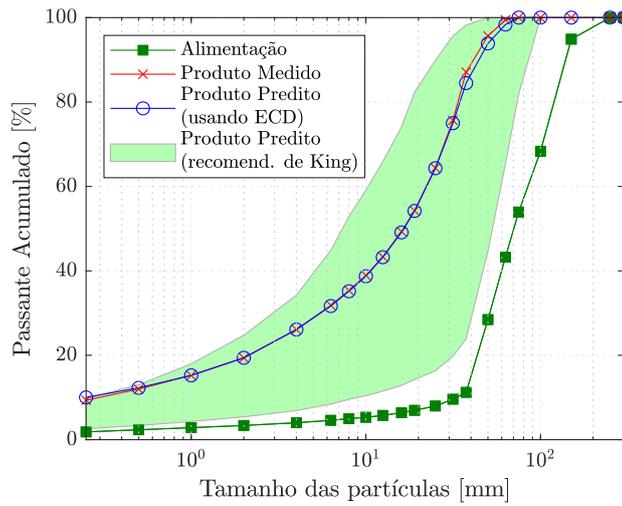
Fonte: O autor.

Nesse cenário, uma solução de compromisso é esperada, já que o modelo do britador cônico é calibrado usando conjuntos de dados obtidos sob diferentes condições de operação. Mesmo assim, as curvas das Figuras 4.3 e 4.4 mostram que os valores da PSD para todos conjuntos de dados se ajustam bem ao modelo para ambas as minas de origem estudadas. Esses resultados demonstram que o modelo de britador cônico baseado na ECD também se comporta bem quando estiverem disponíveis múltiplos conjuntos de dados do mesmo equipamento para calibração, mesmo em diferentes condições de operação. Esse é um cenário prático comum, quando é desejado um modelo válido para uma larga faixa de condições de operação. No cenário final é avaliado se o modelo de britador cônico encontrado pode ser utilizado para prever curvas de PSD para valores arbitrários de CSS. Antes, no entanto, é considerada, no próximo cenário, a avaliação de como o modelo se sai em testes de calibração/validação usando várias combinações dos conjuntos de dados disponíveis.

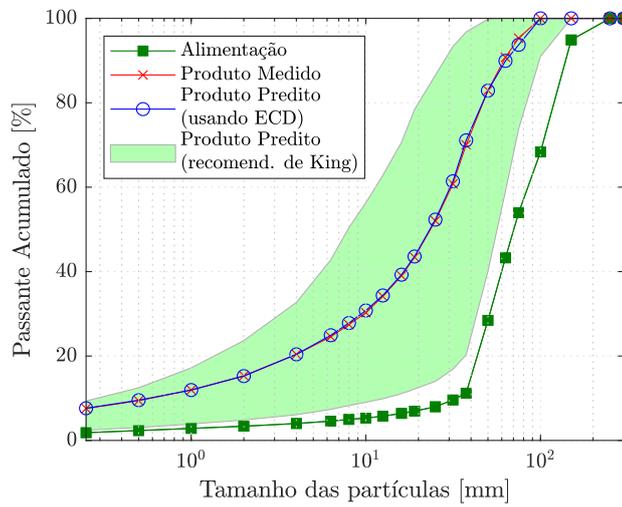
Cenário 3

Nesse cenário, um estudo da calibração e validação foi realizado considerando três conjuntos de dados com diferentes CSSs (para dados de Serra Leste) ou diferentes valores de $F80$ (para os dados de S11D). Foi investigado o uso de combinações de dois conjuntos de dados para calibração e um para validação. Figuras 4.5 e 4.6 ilustram as curvas da PSD medidas e previstas para Serra Leste e S11D, respectivamente. Os parâmetros calibrados obtidos para Serra Leste e S11D estão listados na Tabela 4.5.

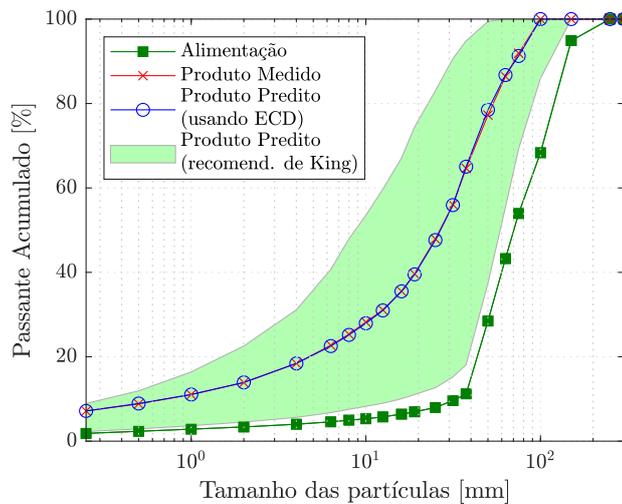
Os valores da SSE obtidos para a predição da PSD do produto na etapa de validação para os conjuntos de dados 1, 2 e 3 foram 487,16; 1488,50; e 76,37, respectivamente. Para os con-



(a) Modelo validado com conjunto de dados 1.



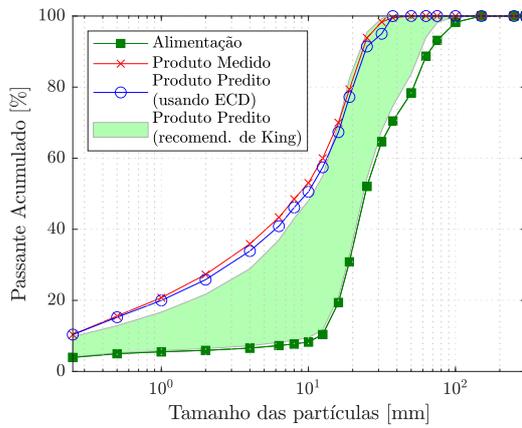
(b) Modelo validado com conjunto de dados 2.



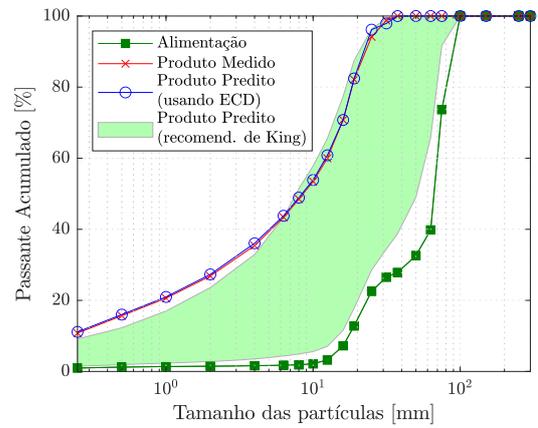
(c) Modelo validado com conjunto de dados 3.

Figura 4.3: Curvas medidas e preditas para a PSD no Cenário 2. Modelos calibrados com os conjuntos de dados (1 a 3) de Serra Leste.

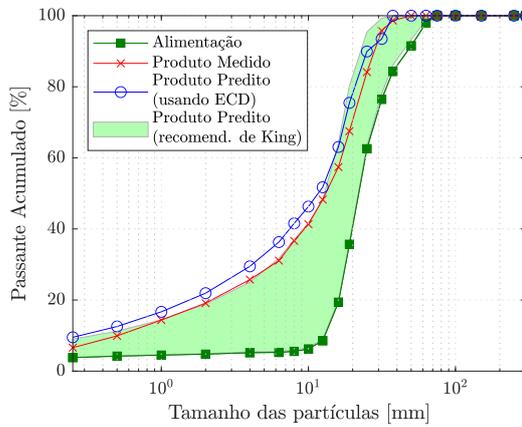
Fonte: O autor.



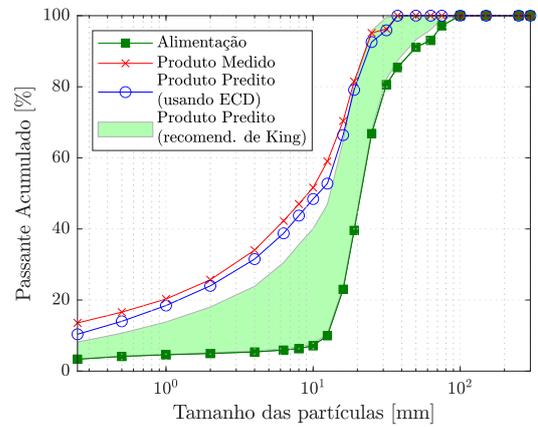
(a) Modelo validado com conjunto de dados 4.



(b) Modelo validado com conjunto de dados 5.



(c) Modelo validado com conjunto de dados 6.



(d) Modelo validado com conjunto de dados 7.

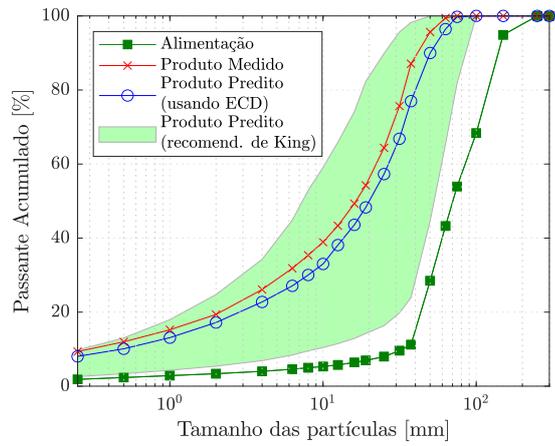
Figura 4.4: Curvas medidas e previstas para a PSD no Cenário 2. Modelos calibrados com os conjuntos de dados (4 a 7) de S11D.

Fonte: O autor.

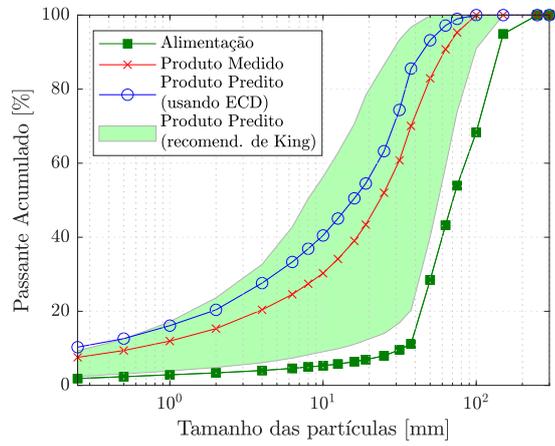
Tabela 4.5: Parâmetros calibrados no Cenário 3.

Conjunto de dados	α_0	α_1	α_2	α_3	β_0	β_1	β_2	β_3	γ_0
2 e 3	0,431	0,249	0	0,096	0	2,507	0	0	1,695
1 e 3	0	7,481	0,277	0	0	2,451	0	0	2,636
1 e 2	0	0,950	0	0	0	0	0,082	0	3,000
5 e 7	0,039	0,222	0	0,279	0,015	1,204	0,037	0,015	3,000
4 e 7	0,021	0,391	0	0,109	0,017	1,309	0,030	0	3,000
4 e 5	0,193	0,486	0	0,005	0,033	1,703	0	0	3,000

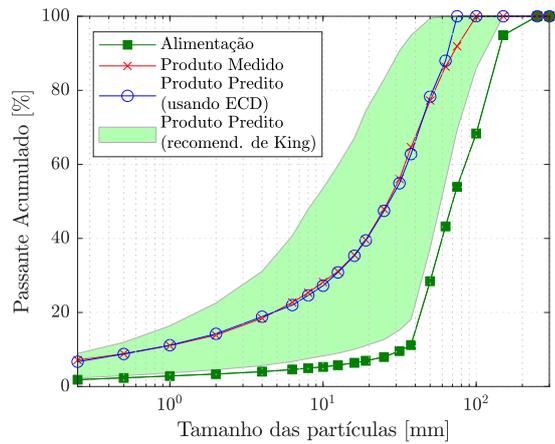
Fonte: O autor.



(a) Modelo calibrado com conjuntos de dados 2 e 3 e validado com conjunto de dados 1.



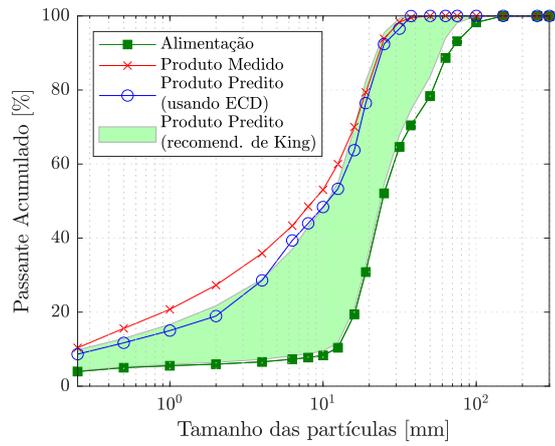
(b) Modelo calibrado com conjuntos de dados 1 e 3 e validado com conjunto de dados 2.



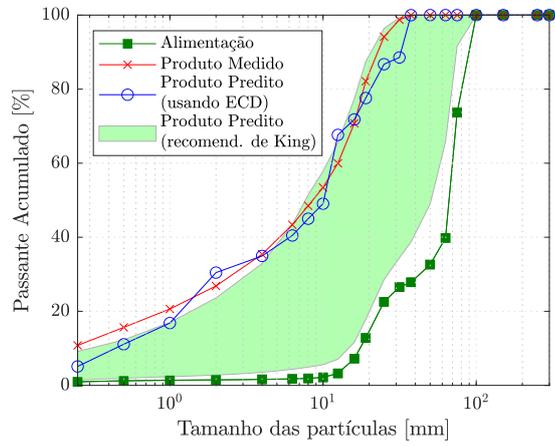
(c) Modelo calibrado com conjuntos de dados 1 e 2 e validado com conjunto de dados 3.

Figura 4.5: Curvas medidas e preditas para a PSD no Cenário 3 para conjuntos de dados de Serra Leste.

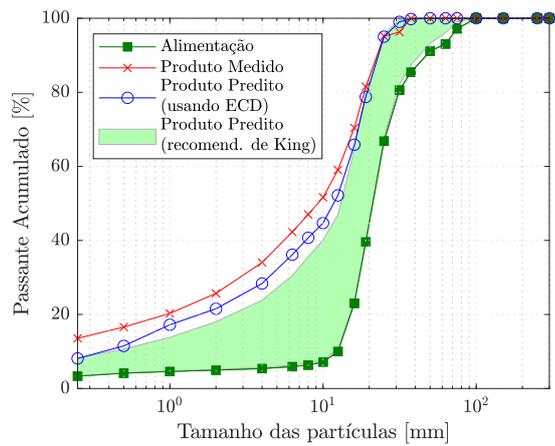
Fonte: O autor.



(a) Modelo calibrado com conjuntos de dados 5 e 7 e validado com conjunto de dados 4.



(b) Modelo calibrado com conjuntos de dados 4 e 7 e validado com conjunto de dados 5.



(c) Modelo calibrado com conjuntos de dados 4 e 5 e validado com conjunto de dados 7.

Figura 4.6: Curvas medidas e preditas para a PSD no Cenário 3 para conjuntos de dados de S11D.

Fonte: O autor.

juntos de dados 4, 5 e 7, os valores da SSE obtidos para a predição da PSD do produto na etapa de validação foram 329,56; 393,64; e 351,02, respectivamente. Nota-se que, apesar desses valores obtidos de SSE serem relativamente altos em comparação com os cenários anteriores, eles não seriam um problema para certas aplicações práticas, como aplicações de controle.

Cenário 4

O objetivo desse cenário é investigar as capacidades de predição do modelo de britador cônico de Serra Leste calibrado no Cenário 2 para diferentes valores de CSS. Especificamente, os valores da PSD do produto foram calculados para valores de CSS iguais a 37; 39; e 40 mm, os quais são valores intermediários das CSSs dos conjuntos de dados usados na calibração. Embora não estejam disponíveis conjuntos de dados com essas CSSs intermediárias para validação do modelo, espera-se que a ordem relativa das curvas da PSD seja consistente com a ordem dos valores de CSS do britador cônico. A Figura 4.7 mostra os valores de PSD medidos para as CSSs usadas na etapa de calibração (35, 38 e 41 mm, marcados na legenda com o símbolo ‘*’) e as PSDs previstas para os valores intermediários de CSS calculados usando o modelo calibrado no Cenário 2. O destaque na parte inferior direita da figura mostra uma visão detalhada da região próxima àquela em que 80% do produto é passante (P_{80}). A Tabela 4.6 mostra o respectivo valor de P_{80} para cada CSS considerado, onde \hat{P}_{80} é o valor predito e P_{80} é o valor medido. O fato dos valores de \hat{P}_{80} também aparecerem em ordem ascendente quando os valores de CSS estão organizados em ordem ascendente confirma que o modelo calibrado pode ser útil na predição da PSD para valores intermediários de CSS.

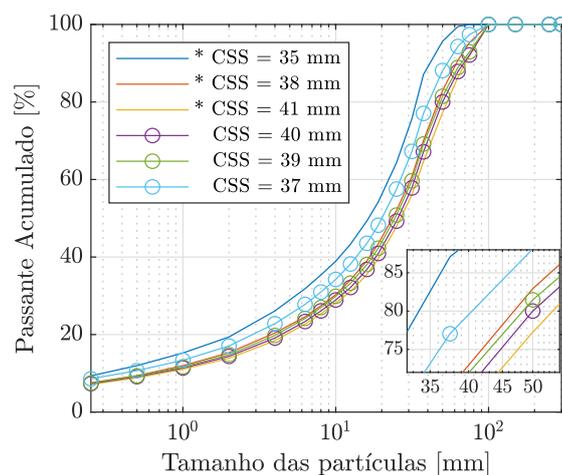


Figura 4.7: Curvas medidas da PSD para CSS = 35; 38; e 41 mm. Curvas previstas da PSD para CSS = 37; 39; e 40 mm. Região próxima ao P_{80} em destaque.

Fonte: O autor.

Os resultados apresentados nesse cenário mostram como o modelo calibrado de britador cônico pode ser utilizado em simulações dinâmicas para prever as PSDs do produto sob condições de operação diferentes daquelas consideradas na etapa de calibração. Essa caracte-

Tabela 4.6: Valores de $P80$ no Cenário 4.

CSS [mm]	*35	37	*38	39	40	*41
$\hat{P}80$ [mm]	34,66	40,84	46,95	48,51	50,00	52,39
$P80$ [mm]	33,78	-	47,16	-	-	53,90

Fonte: O autor.

terística é importante por permitir explorar diferentes condições de operação com o objetivo de otimizar certos critérios de desempenho do britador, tais como taxa de produção ou a PSD do produto.

Nesse cenário, somente a sensibilidade do modelo a alterações de CSS foi estudada. Para obter resultados mais abrangentes, um estudo similar deve ser realizado para cada variável de operação que afeta o modelo do britador cônico. Somente dessa forma é possível avaliar por completo a robustez do modelo calibrado. No entanto, os resultados apresentados aqui demonstram que o modelo prediz satisfatoriamente a tendência esperada para o $P80$ com relação às variações no CSS do britador cônico, com um erro médio de predição de 1,97%, como mostrado na Tabela 4.6.

5. Conclusão

Essa dissertação demonstra que simulações dinâmicas podem fornecer resultados acurados e confiáveis para serem utilizados como auxílio na tomada de decisão de alterações físicas e de controle de processos. Para concluir esse trabalho, são revisitadas nessa seção as perguntas formuladas para o desenvolvimento dessa pesquisa, trazendo as respostas obtidas nessa dissertação:

- A simulação proposta permite definir a melhor configuração, dentre as testadas, para o problema de alocação de britadores terciários de S11D?

Sim. A simulação realizada para responder essa pergunta foi capaz de mostrar as diversas consequências da substituição de alguns britadores por outros de maior capacidade. Por meio da simulação, os dados de níveis médios de silos, tempo de operação de equipamentos e taxa média de saída de material puderam ser comparados, inclusive com diferentes condições de taxa de alimentação. Por fim, pôde-se chegar a conclusão que trocar os britadores das três primeiras posições é o cenário que traz maiores benefícios para planta, sendo esse o cenário escolhido pela equipe de S11D para utilização, apresentando ganhos de produtividade também na planta real.

- A simulação proposta permite definir a melhor velocidade máxima de translação, dentre as testadas, do sistema de distribuição de material do peneiramento primário/britagem secundária de S11D?

Sim. Da mesma forma do estudo de caso da alocação de britadores, a simulação mostrou as consequências desse aumento de velocidade máxima de translação, permitindo a comparação, entre outros dados, do tempo de bloqueios da alimentação e de silos, além de ocorrências de ilhas. Com a simulação, conclui-se que o aumento da velocidade máxima de 5,87 m/min para 9,72 m/min resultará em maiores ganhos de produtividade, principalmente com a condição de taxa alta de alimentação. Apesar da alteração ainda não ter sido realizada na prática, certamente a equipe de S11D se baseará nesse estudo no momento em que decidirem pelo repotenciamento dos equipamentos.

- A simulação proposta permite definir a melhor estratégia, entre a proposta e a pré-existente, de controle da velocidade dos alimentadores do peneiramento secundário de S11D?

Sim. Os dados fornecidos pela simulação permitem concluir que, em comparação com o método existente baseado em regras, o controlador em *override* proposto apresentou melhor aproveitamento da capacidade das correias transportadoras, aumentando inclusive a taxa de produção e levando a alterações mais suaves nas taxas medidas em cada uma das correias. A partir dos resultados desse estudo, a equipe de S11D tomou a decisão de utilizar a estratégia de controle proposta, proporcionando que fossem observados nas usinas reais ganhos semelhantes aos vistos na simulação.

- A estratégia proposta permite encontrar modelos ótimos para a distribuição granulométrica do produto de britadores cônicos de Serra Leste e S11D?

Sim. Na estratégia proposta, a função de classificação do britador, que possui nove parâmetros de calibração, se mantém sem alterações. A função de quebra, por outro lado, é alterada para aumentar o número de variáveis de decisão no problema de calibração. Especificamente, todos os elementos da matriz de quebra são considerados parâmetros, enquanto a estratégia de calibração aplicada na literatura utiliza uma versão condensada da matriz de quebra, na qual os elementos são expressos como uma função de três parâmetros somente. Os resultados mostram que a estratégia proposta permitiu a predição da Distribuição do Tamanho das Partículas (*Particle Size Distribution*, PSD) do produto para diferentes valores de Abertura na Posição Fechada (*Closed Side Setting*, CSS), de acordo com os resultados esperados.

6. Trabalhos Futuros

Baseando-se na pesquisa realizada nessa dissertação, algumas possibilidades de trabalhos futuros surgem. Nos estudos de caso sobre o uso da simulação dinâmica para auxílio na tomada de decisão de alterações físicas e de controle, os simuladores construídos foram especificamente para cada área de S11D em que o respectivo estudo se aplicava. Como trabalho futuro, pode-se juntar os modelos de cada área e obter uma simulação geral, permitindo verificar, por exemplo, os efeitos de alterações sobre áreas que fazem interface com a área que sofreu alguma modificação. Outra possibilidade é incorporar fatores econômicos na metodologia atual. Isso permitiria responder perguntas como “O aumento de produção obtido com a alteração é grande o suficiente para compensar um possível aumento na quantidade de manutenção a ser realizada nos novos equipamentos?” ou, ainda, “Apesar de produzir mais, o equipamento está parando e partindo mais vezes por hora. Até que ponto isso é vantajoso, devido a uma provável diminuição da vida útil do equipamento?”.

Outra forma de continuar esse trabalho é trazendo um foco maior para as estratégias de controle utilizadas. Por exemplo, visto que existem algumas diferenças entre as estratégias de controle de cada área de S11D para a distribuição de material entre os silos, será que, além de alterar a velocidade máxima da translação do cabeça móvel do peneiramento primário/britagem secundária, uma alteração na estratégia de controle traria maiores ganhos? Outro exemplo pode ser aplicado à alteração de estratégia da área de peneiramento secundário: ainda que os resultados obtidos com o controlador Proporcional-Integral (PI) foram satisfatórios no controle *override*, trabalhos futuros poderão considerar a utilização de um Preditor de Smith ou outras técnicas recomendadas para plantas com atrasos de transporte significativos.

Com relação à calibração dos parâmetros do modelo de britadores cônicos, uma das principais vantagens da metodologia proposta é a utilização de dados que normalmente já estão disponíveis na planta, como taxa de produção e Abertura na Posição Fechada (*Closed Side Setting*, CSS). Trabalhos futuros poderão utilizar mais conjuntos de dados e, principalmente, conjuntos de dados que representem diferentes condições de operação do equipamento. Isso permitirá a exploração dos efeitos das outras variáveis operacionais no modelo, como as propriedades do revestimento do manto e a amplitude dos golpes excêntricos.

Referências Bibliográficas

- ALBUQUERQUE, K., SILVA, H., TEODORO, E., FONSECA, A., GARIOLI, G., LOPES, Ê., COTA, L., EUZÉBIO, T. “Averaging Level Control of Bulk Solid Material using a Tripper Car”, **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 14, pp. 147 – 152, 2019. doi:10.1016/j.ifacol.2019.09.179.
- ANDERSEN, J. S. **Development of a cone crusher model**. Dissertação (Mestrado), School of Engineering, The University of Queensland, Brisbane, 1988.
- ANTICOI, H., GUASCH, E., HAMID, S. A., OLIVA, J., ALFONSO, P., GARCIA-VALLES, M., BASCOMPTA, M., SANMIQUEL, L., ESCOBET, T., ARGELAGUET, R., OTHERS. “Breakage function for HPGR: Mineral and mechanical characterization of tantalum and tungsten ores”, **Minerals**, v. 8, n. 4, pp. 170, 2018. doi:10.3390/min8040170.
- ANTICOI, H., GUASCH, E., OLIVA, J., ALFONSO, P., BASCOMPTA, M., SANMIQUEL, L. “High-pressure grinding rolls: Model validation and function parameters dependency on process conditions”, **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 6, pp. 5476–5489, 2019. doi:10.1016/j.jmrt.2019.09.016.
- ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., EVERTSSON, M. “Modelling and dynamic simulation of gradual performance deterioration of a crushing circuit – Including time dependence and wear”, **Minerals Engineering**, v. 33, pp. 13–19, 2012. ISSN: 0892-6875. doi:10.1016/j.mineng.2012.01.016.
- ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., EVERTSSON, C. M. “An on-line training simulator built on dynamic simulations of crushing plants”, **IFAC Proceedings Volumes**, v. 46, n. 16, pp. 218 – 223, 2013. doi:10.3182/20130825-4-US-2038.00105.
- ATTA, K. T., JOHANSSON, A., GUSTAFSSON, T. “Control oriented modeling of flow and size distribution in cone crushers”, **Minerals Engineering**, v. 56, pp. 81–90, 2014. doi:10.1016/j.mineng.2013.10.031.
- ATTA, K. T., EUZÉBIO, T., IBARRA, H., MOREIRA, V. S., JOHANSSON, A. “Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model”, **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 14, pp. 1–6, 2019. doi:10.1016/j.ifacol.2019.09.154.

- BACIC, M. “On hardware-in-the-loop simulation”. In: **Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control**, pp. 3194–3198. IEEE, 2005. doi:10.1109/CDC.2005.1582653.
- BENETELI, T., EUZÉBIO, T., COTA, L., DUARTE, R. **Procedimentos para integração irace-MATLAB: calibrando parâmetros de heurísticas**. Relatório técnico, Instituto Tecnológico Vale, 2021. doi:10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2021.15.Beneteli.
- BERNARDI, L., KUMRAL, M., RENAUD, M. “Comparison of fixed and mobile in-pit crushing and conveying and truck-shovel systems used in mineral industries through discrete-event simulation”, **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 103, pp. 102100, 2020. doi:10.1016/j.simpat.2020.102100.
- BHADANI, K., ASBJÖRNSSON, G., HULTHÉN, E., BENGTSSON, M., EVERTSSON, M. “Comparative study of optimization schemes in mineral processing Simulations”. In: **Proceedings of XXIX International Minerals Processing Congress**, pp. 464–473, 2018.
- BOGGS, P. T., TOLLE, J. W. “Sequential Quadratic Programming”, **Acta Numerica**, v. 4, pp. 1–51, 1995. doi:10.1017/S0962492900002518.
- BOSCHERT, S., ROSEN, R. “**Digital Twin - The Simulation Aspect**”. In: **Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers**, pp. 59 – 74, Cham, Springer International Publishing, 2016. doi:10.1007/978-3-319-32156-1_5.
- CALDAS, F. N., MARTINS, A. X. “Proposed Solutions to the Tripper Car Positioning Problem”. In: **Proceedings of the 20th International Conference on Enterprise Information Systems**, v. 1, pp. 344 – 352, Funchal, 2018. doi:10.5220/0006806303440352.
- CAMPOS, M., TEIXEIRA, H. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. São Paulo, Editora Blucher, 2010.
- CAMPOS, T. M., BUENO, G., BARRIOS, G. K., TAVARES, L. M. “Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 2: Modeling and simulation”, **Minerals Engineering**, v. 140, pp. 105876, 2019a. doi:10.1016/j.mineng.2019.105876.
- CAMPOS, T. M., BUENO, G., TAVARES, L. “Comparação de cenários industriais de prensagem de pellet feed via simulação”. In: **7º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios**, pp. 13 – 25, 2019b. doi:10.5151/2594-357X-33145.

- CHEHREGHANI, S., NOAPARAST, M., REZAI, B., SHAFAEI, S. Z. “Bonded-particle model calibration using response surface methodology”, **Particuology**, v. 32, pp. 141–152, 2017. doi:10.1016/j.partic.2016.07.012.
- CHEN, X.-S., ZHAI, J.-Y., LI, S.-H., LI, Q. “Application of model predictive control in ball mill grinding circuit”, **Minerals Engineering**, v. 20, n. 11, pp. 1099 – 1108, 2007. doi:10.1016/j.mineng.2007.04.007.
- CISTERNAS, L. A., LUCAY, F. A., BOTERO, Y. L. “Trends in modeling, design, and optimization of multiphase systems in minerals processing”, **Minerals**, v. 10, n. 1, pp. 22, 2020. doi:10.3390/min10010022.
- CLEARY, P., SINNOTT, M., MORRISON, R., CUMMINS, S., DELANEY, G. “Analysis of cone crusher performance with changes in material properties and operating conditions using DEM”, **Minerals Engineering**, v. 100, pp. 49–70, 2017. doi:10.1016/j.mineng.2016.10.005.
- CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Belt Conveyors for Bulk Materials**. Naples, Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2007.
- DAI, W., ZHOU, P., ZHAO, D., LU, S., CHAI, T. “Hardware-in-the-loop simulation platform for supervisory control of mineral grinding process”, **Powder technology**, v. 288, pp. 422 – 434, 2016. doi:10.1016/j.powtec.2015.11.032.
- DANIEL, M. J., MORRELL, S. “HPGR model verification and scale-up”, **Minerals Engineering**, v. 17, n. 11-12, pp. 1149–1161, 2004. doi:10.1016/j.mineng.2004.05.016.
- DRAGOMIR, T. L., CODREAN, A., CEREGAN, V. “On an elementary problem of modelling dead time systems”, **Journal of Electrical Engineering**, v. 9, n. 2, pp. 8–8, 2009.
- DUARTE, R., LOPES, Ê., VARGAS, T., EUZÉBIO, T. **Simulação dos efeitos de substituição dos britadores CH660 por britadores CH860 na britagem terciária de S11D**. Relatório técnico, Instituto Tecnológico Vale, 2019. doi:10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2019.11.Duarte.
- DUARTE, R., VARGAS, T., COTA, L., EUZÉBIO, T., SILVA, H., RUSSO, D., OLIVEIRA, J., SOUZA, R., CALDONCELLI, P., GOMES, A., GARIOLI, G., ALBUQUERQUE, K. **Simulação dinâmica da área 2012 de S11D: Suporte à decisão na alteração da lógica de controle e repotenciamento do cabeça móvel**. Relatório técnico, Instituto Tecnológico Vale, 2020a. doi:10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2020.15.Duarte.
- DUARTE, R. A., PINTO, T. V. B., LOPES JÚNIOR, Ê., FONSECA, A. G., ALBUQUERQUE, K. S., EUZÉBIO, T. A. M. “Ganhos de produtividade em um circuito de

- britagem devido à aplicação de controle override”. In: **XXIII Congresso Brasileiro de Automática**, 2020b. doi:10.48011/asba.v2i1.1574.
- ESNAULT, V. P. B., ZHOU, H., HEITZMANN, D. “New population balance model for predicting particle size evolution in compression grinding”, **Minerals Engineering**, v. 73, pp. 7–15, 2015. doi:10.1016/j.mineng.2014.12.036.
- EVERTSSON, C. M. “Modelling of flow in cone crushers”, **Minerals Engineering**, v. 12, n. 12, pp. 1479–1499, 1999. doi:10.1016/S0892-6875(99)00136-3.
- EVERTSSON, C. M. **Cone crusher performance**. Göteborg, Chalmers University of Technology, 2000. ISBN: 9171978569. doi:10.13140/RG.2.1.2212.7526.
- GUPTA, A., YAN, D. S. **Mineral processing design and operations: An introduction**. 2 ed. Amsterdam, Elsevier, 2016. ISBN: 9780444635891. doi:10.1016/C2014-0-01236-1.
- HASANZADEH, V., FARZANEGAN, A. “Robust HPGR model calibration using genetic algorithms”, **Minerals Engineering**, v. 24, n. 5, pp. 424–432, 2011. doi:10.1016/j.mineng.2010.12.004.
- HERBST, J., RAJAMANI, R., MULAR, A., FLINTOFF, B. “Mineral processing plant/circuit simulators: An overview”, **Mineral Processing Plant Design, Practice and Control**, v. 1, pp. 383 – 403, 2002.
- HERBST, J., OBLAD, A. “Modern Control Theory Applied to Crushing Part 1: Development of a Dynamic Model for a Cone Crusher and Optimal Estimation of Crusher Operating Variables”, **IFAC Proceedings Volumes**, v. 18, n. 6, pp. 301–307, 1985. doi:10.1016/S1474-6670(17)60525-1.
- HULTHÉN, E. **Real-time Optimization of Cone Crushers**. Tese de Doutorado, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2010.
- ITÄVUO, P., HULTHÉN, E., VILKKO, M. “Feed-hopper level estimation and control in cone crushers”, **Minerals Engineering**, v. 110, pp. 82 – 95, 2017. doi:10.1016/j.mineng.2017.04.010.
- JANSEN, M., GLASTONBURY, J. “The size separation of particles by screening”, **Powder Technology**, v. 1, n. 6, pp. 334–343, 1968. ISSN: 0032-5910. doi:10.1016/0032-5910(68)80016-6.
- JOHANSSON, M., EVERTSSON, C. “Applying linear model predictive control to crushing circuit simulations”. In: **XXIX International Mineral Processing Congress**, pp. 3423 – 3432, 2018.

- KAMENOPOULOS, S., AGIOUTANTIS, Z., KOMNITSAS, K. “A new hybrid decision support tool for evaluating the sustainability of mining projects”, **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 28, n. 2, pp. 259–265, 2018. doi:10.1016/j.ijmst.2017.07.001.
- KARELOVIC, P., PUTZ, E., CIPRIANO, A. “Dynamic hybrid modeling and simulation of grinding–flotation circuits for the development of control strategies”, **Minerals Engineering**, v. 93, pp. 65–79, 2016. doi:10.1016/j.mineng.2016.01.021.
- KARELOVIC, P., PUTZ, E., CIPRIANO, A. “A framework for hybrid model predictive control in mineral processing”, **Control Engineering Practice**, v. 40, pp. 1 – 12, 2015. doi:10.1016/j.conengprac.2015.02.006.
- KARR, C. L., YEAGER, D. “Calibrating computer models of mineral processing equipment using genetic algorithms”, **Minerals Engineering**, v. 8, n. 9, pp. 989–998, 1995. doi:10.1016/0892-6875(95)00062-U.
- KHALESI, M. R., ZAREI, M. J., SAYADI, A. R., KHOSHNAM, F., CHEGENI, M. H. “Development of a techno-economic simulation tool for an improved mineral processing plant design”, **Minerals Engineering**, v. 81, pp. 103–108, 2015. doi:10.1016/j.mineng.2015.07.018.
- KING, R. P. “Simulation - The modern cost-effective way to solve crusher circuit processing problems”, **International Journal of Mineral Processing**, v. 29, n. 3, pp. 249 – 265, 1990. doi:10.1016/0301-7516(90)90057-6.
- KING, R. P. **Modeling and simulation of mineral processing systems**. Woburn, Elsevier, 2001. doi:10.1016/C2009-0-26303-3.
- KLIMPEL, R., AUSTIN, L. “The back-calculation of specific rates of breakage from continuous mill data”, **Powder Technology**, v. 38, n. 1, pp. 77–91, 1984. doi:10.1016/0032-5910(84)80036-4.
- KRITZINGER, W., KARNER, M., TRAAR, G., HENJES, J., SIHN, W. “Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification”, **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, pp. 1016 – 1022, 2018. doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- LEITE, M. M. “Kinetic models for the simulation of crushing circuits”, **Minerals Engineering**, v. 3, n. 1-2, pp. 165–180, 1990. doi:10.1016/0892-6875(90)90089-T.
- LU, S., ZHOU, P., CHAI, T., DAI, W. “Modeling and simulation of whole ball mill grinding plant for integrated control”, **IEEE Transactions on automation science and engineering**, v. 11, n. 4, pp. 1004–1019, 2014. doi:10.1109/TASE.2013.2296309.

- LYNCH, A. J., NARAYANAN, S. S. “**Simulation - The design tool for the future**”. In: *Mineral Processing at a Crossroads: Problems and Prospects*, pp. 89 – 116, Dordrecht, Springer Netherlands, 1986. doi:10.1007/978-94-009-4476-3_4.
- LYNCH, A. **Mineral crushing and grinding circuits: Their simulation, optimization, design, and control**, v. 1. Amsterdam, Elsevier Science Ltd, 1977.
- MAESTRE, J. M., RIDAO, M. A., KOZMA, A., SAVORGNAN, C., DIEHL, M., DOAN, M. D., SADOWSKA, A., KEVICZKY, T., DE SCHUTTER, B., SCHEU, H., MARQUARDT, W., VALENCIA, F., ESPINOSA, J. “A comparison of distributed MPC schemes on a hydro-power plant benchmark”, **Optimal Control Applications and Methods**, v. 36, n. 3, pp. 306–332, 2015. doi:10.1002/oca.2154.
- MAGALHÃES, S., EUZÉBIO, T. “Supervisory fuzzy controller for thickener underflow solids concentration on a simulated platform”. In: **6th International Congress on Automation in Mining**, 2018.
- MOREIRA, V. D. S., EUZÉBIO, T. A. M. “Modelagem e Controle de Abertura de Câmara de Britadores Cônicos”. In: **Proceedings of the XXII Congresso Brasileiro de Automática**, v. 10, 2018. doi:10.20906/CPS/CBA2018-1402.
- NAPIER-MUNN, T. J., LYNCH, A. “The modelling and computer simulation of mineral treatment processes — Current status and future trends”, **Minerals Engineering**, v. 5, n. 2, pp. 143 – 167, 1992. doi:10.1016/0892-6875(92)90039-C.
- NAPIER-MUNN, T. J., MORRELL, S., MORRISON, R. D., KOJOVIC, T. **Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation**. JKMRRC monograph series in mining and mineral processing. Indooroopilly, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996. ISBN: 9780646288611.
- NEVES, P. B. D., TAVARES, L. M. M. “Racionalização do uso da energia na britagem com auxílio de simulação computacional”, **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v. 1, n. 2, pp. 53 – 58, 2004. doi:10.4322/tmm.00102012.
- OLIVIER, L. E., CRAIG, I. K. “A survey on the degree of automation in the mineral processing industry”. In: **2017 IEEE AFRICON**, pp. 404 – 409. IEEE, 2017. doi:10.1109/AFRCON.2017.8095516.
- OZDEMIR, B., KUMRAL, M. “Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines”, **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 95, pp. 36–48, 2019. doi:10.1016/j.simpat.2019.04.006.
- PARICHEH, M., OSANLOO, M. “A simulation-based risk management approach to locating facilities in open-pit mines under price and grade uncertainties”,

- Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 89, pp. 119–134, 2018. doi:10.1016/j.simpat.2018.09.015.
- PARTHASARATHI, P., SZARUGA, V., SZATKOWSKI, M. “BENEFITS OF DYNAMIC PROCESS SIMULATION FOR MINERAL INDUSTRY”, **Recent Advances in Mineral Processing Plant Design**, p. 85, 2009.
- PEREZ, E., BOUCHARD, J., POULIN, É. “Development and calibration of an autogenous/semi-autogenous mill simulation model for process control applications”. In: **Proceedings of the 58th Conference of Metallurgists Hosting the International Copper Conference 2019**, Vancouver, 2019.
- QI, Q., TAO, F. “Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison”, **IEEE Access**, v. 6, pp. 3585–3593, 2018. doi:10.1109/ACCESS.2018.2793265.
- QUE, S., AWUAH-OFFEI, K., FRIMPONG, S. “Optimising design parameters of continuous mining transport systems using discrete event simulation”, **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, v. 30, n. 3, pp. 217–230, 2016. doi:10.1080/17480930.2015.1037056.
- QUIST, J., EVERTSSON, C. M. “Cone crusher modelling and simulation using DEM”, **Minerals Engineering**, v. 85, pp. 92–105, 2016. doi:10.1016/j.mineng.2015.11.004.
- REIS, L., LOPES JÚNIOR, Ê., EUZÉBIO, T. “Hardware-in-the-Loop Testing Platform of a Predictive Controller Applied to a Simulated Regrinding Circuit”. In: **6th International Congress on Automation in Mining**, 2018.
- RICHTER, C., RÖSSLER, T., KUNZE, G., KATTERFELD, A., WILL, F. “Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials – Part II: Efficient optimization-based calibration”, **Powder Technology**, v. 360, pp. 967–976, 2020. doi:10.1016/j.powtec.2019.10.052.
- ROUMPOS, C., PARTSINEVELOS, P., AGIOUTANTIS, Z., MAKANTASIS, K., VLACHOU, A. “The optimal location of the distribution point of the belt conveyor system in continuous surface mining operations”, **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 47, pp. 19–27, 2014. doi:10.1016/j.simpat.2014.04.006.
- SANTOS, M. S., PINTO, T. V., JÚNIOR, Ê. L., COTA, L. P., SOUZA, M. J., EUZÉBIO, T. A. “Simheuristic-based decision support system for efficiency improvement of an iron ore crusher circuit”, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 94, pp. 103789, 2020. doi:10.1016/j.engappai.2020.103789.

- SBÁRBARO, D., DEL VILLAR, R. **Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants**. London, Springer Science & Business Media, 2010. doi:10.1007/978-1-84996-106-6.
- SBARBARO, D., ORTEGA, R. “Averaging level control: An approach based on mass balance”, **Journal of Process Control**, v. 17, n. 7, pp. 621–629, 2007. doi:10.1016/j.jprocont.2007.01.005.
- SCHULZE, D. **Powders and bulk solids: Behavior, characterization, storage and flow**. Berlin, Springer, 2008. doi:10.1007/978-3-540-73768-1.
- SEPPÄLÄ, P., SORSA, A., PAAVOLA, M., RUUSKA, J., REMES, A., KUMAR, H., LAMBERG, P., LEIVISKÄ, K. “Development and calibration of a dynamic flotation circuit model”, **Minerals Engineering**, v. 96, pp. 168–176, 2016. doi:10.1016/j.mineng.2016.07.004.
- SHAFTO, M., CONROY, M., DOYLE, R., GLAESSGEN, E., KEMP, C., LEMOIGNE, J., WANG, L. “Draft modeling, simulation, information technology & processing roadmap”, **Technology Area**, v. 11, 2010.
- SIVASUBRAMANI, S., SWARUP, K. S. “Hybrid DE–SQP algorithm for non-convex short term hydrothermal scheduling problem”, **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 1, pp. 757–761, 2011. doi:10.1016/j.enconman.2010.07.056.
- STANGE, W. “The optimization of the CIP process using mathematical and economic models”, **Minerals Engineering**, v. 4, n. 12, pp. 1279–1295, 1991. doi:10.1016/0892-6875(91)90172-R.
- SUVARNA, M., DIVAKARAN, M., NDUAGU, E. I. “Process modelling and simulation of bitumen mining and recovery from oil sands”, **Minerals Engineering**, v. 134, pp. 65–76, 2019. doi:10.1016/j.mineng.2018.12.024.
- TAO, F., QI, Q. “Make more digital twins”, **Nature**, v. 573, pp. 490 – 491, 2019. doi:10.1038/d41586-019-02849-1.
- TORRES, M., CASALI, A. “A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls”, **Minerals Engineering**, v. 22, n. 13, pp. 1137–1146, 2009. doi:10.1016/j.mineng.2009.04.011.
- VAN DRUNICK, B., OTHERS. “Expert mill control at AngloGold Ashanti”, **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 105, n. 7, pp. 497 – 506, 2005. doi:10520/AJA0038223X_3000.

- VARGAS, T., COTA, L., EUZÉBIO, T., FONSECA, A., ALBUQUERQUE, K., DUARTE, R. **Implantação de controlador fuzzy de taxa no peneiramento secundário de S11D**. Relatório técnico, Instituto Tecnológico Vale, 2020. doi:10.29223/PROD.TEC.ITV.MI.2020.31.Vargas.
- WHITEN, W. “The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression”, **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 72, n. 10, pp. 257–264, 1972.
- WHITEN, W., WALTER, G., WHITE, M. “A breakage function suitable for crusher models”, **Fracture at Work**, p. 19, 1979.
- YAMASHITA, A. S., THIVIERGE, A., EUZÉBIO, T. A. “A review of modeling and control strategies for cone crushers in the mineral processing and quarrying industries”, **Minerals Engineering**, v. 170, pp. 107036, 2021. doi:10.1016/j.mineng.2021.107036.
- YIANATOS, J., VALLEJOS, P., GRAU, R., YAÑEZ, A. “New approach for flotation process modelling and simulation”, **Minerals Engineering**, v. 156, pp. 106482, 2020. doi:10.1016/j.mineng.2020.106482.
- YOUNG, C. A. **SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook**. Colorado, USA, Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2019.
- ZUPANČIČ, B., SODJA, A. “Computer-aided physical multi-domain modelling: Some experiences from education and industrial applications”, **Simulation modelling practice and theory**, v. 33, pp. 45–67, 2013. doi:10.1016/j.simpat.2012.03.009.